

COMPORTAMENTO DE PAINÉIS DE FACHADA EM GRC SUJEITOS A CARREGAMENTOS CÍCLICOS OU MONOTONICAMENTE CRESCENTES

JOANA CAROLINA LOPES PAIS LOUREIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professor Doutor Carlos Filipe Ferreira de Sousa

Co-Orientador: Professor Doutor Afonso António de Serra Neves

Co-Orientador: Engenheiro João Ribeiro

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*" Tu não desistas,
Continua na procura e olha para cada dia como uma nova aventura,
Isto não dura sempre,
Há muito pela frente e quem se empenha e tenta vai e fura!"*
Capicua

AGRADECIMENTOS

A todos os que me acompanharam neste percurso da minha vida que, das mais variadas formas, contribuíram para que fossem atingidos os objetivos a que me propus, gostaria de expressar a minha sincera gratidão. Pela disponibilidade, amizade e compreensão gostaria de agradecer:

- Aos meus Pais, por todo o afeto, apoio incondicional e constante e, sobretudo, pelo que me ensinaram até hoje. Gostaria de agradecer também à minha família, pelo apoio e pela força que me dão sempre;
- Aos meus amigos que, de forma direta ou indireta, estiveram ao meu lado. Agradeço todo o apoio e incentivo;
- Ao meu Orientador, o Prof. Carlos Sousa, por toda a disponibilidade, conselhos, ensinamentos e paciência ao longo deste semestre. Sem dúvida que tenho aprendido muito, um sincero obrigado;
- Ao meu Coorientador, o Prof. Afonso Serra Neves, pela disponibilidade, apoio e conhecimentos transmitidos durante a realização deste trabalho;
- A todos os técnicos do Laboratório de Materiais de Construção, LEMC, pela ajuda, atenção, bom ambiente de trabalho e convívio que me proporcionaram;
- Ao José Gomes, pela paciência e ajuda durante a realização deste trabalho, muito obrigado;
- Ao grupo Mota – Engil, nomeadamente, ao Engenheiro João Ribeiro, Engenheiro Paulo Lopes e Engenheiro Mário Lacerda, quero expressar a minha gratidão por toda a disponibilidade, apoio e colaboração neste trabalho. De outra forma não teria sido possível desenvolver esta dissertação.

RESUMO

Nos últimos tempos, o recurso a fachadas pré-fabricadas tem verificado um crescimento considerável na Engenharia Civil. Neste contexto, surge a utilização, cada vez mais, do GRC (*Glass fiber Reinforced Concrete*), que tem assumido um papel preponderante devido às inúmeras vantagens que apresenta. Este compósito, que consiste numa dispersão de fibras de vidro numa argamassa de cimento, apresenta características como o baixo peso, a versatilidade e elevados níveis de desempenho.

Este trabalho apresenta um estudo realizado no âmbito da utilização de painéis de fachada em GRC, e teve como principal objetivo caracterizar o seu desempenho sob ações monotónicas e cíclicas. Em linhas gerais, a partir da bibliografia consultada, foram estabelecidos os aspetos principais a abordar, com interesse, para este estudo. Estabelecidos os objetivos, foram estudados os ensaios experimentais a realizar. Numa fase final, foram interpretados os resultados obtidos.

Em painéis de fachada, o GRC está sujeito a inúmeras ações que podem afetar o seu comportamento e propriedades. Para além do material em si, interessa também perceber a forma como o elemento está ligado à restante estrutura, ou seja, conhecer o sistema de fixação. Neste sentido, foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais que permitissem abordar, de várias formas diferentes, os parâmetros principais e de interesse para este estudo. As campanhas experimentais realizadas foram de caráter monotónico, nas quais se ensaiaram painéis em grande escala e provetes do mesmo material, e de caráter cíclico, em provetes análogos. Nos ensaios monotónicos, constaram ensaios de funcionamento global dos painéis, com cargas distribuída, e ensaios de resistência à flexão do GRC. Para os ensaios cíclicos, foi desenvolvida uma metodologia que compreendia uma parte inicial em regime monotónico e, seguidamente, a ação repetida de cargas cíclicas sobre os mesmos provetes até à rotura por fadiga.

A partir dos resultados, foi possível apresentar, através de vários parâmetros, os gráficos mais representativos dos dois tipos de comportamento, com analogias entre ambos. A discussão dos resultados permitiu concluir sobre o funcionamento geral do painel e sistema de fixação, e sobre o desempenho do GRC, quando sujeito a condições de carregamento estático crescente ou de carregamento cíclico.

Através dos ensaios do funcionamento global testou-se o comportamento mecânico do painel de estudo e das suas fixações a partir da aplicação de cargas lineares. O carregamento definido para o ensaio permitiu simular o painel real sujeito a uma carga uniformemente distribuída. Deste modo, foi possível avaliar a capacidade resistente do painel na zona do meio vão e a capacidade resistente das fixações.

Os ensaios de resistência à flexão do GRC permitiram caracterizar a resistência a carregamentos monotonicamente crescentes e avaliar o desempenho mecânico do material. Através deste ensaio avaliou-se a viabilidade de utilizar a técnica de videogrametria para medição das deformações.

Os ensaios cíclicos permitiram compreender e descrever o comportamento do GRC quando sujeito a carregamentos repetidos. Com base nestes ensaios, foi possível confrontar os resultados com os dados disponíveis na bibliografia consultado sobre a resistência à fadiga do GRC.

Por fim, a partir do conjunto de ensaios realizados, foi então possível, atingir os objetivos principais e obter uma melhor compreensão acerca do funcionamento de um painel de fachada quando sujeito a diferentes tipos de ações.

PALAVRAS-CHAVE: GRC, fibras de vidro, painéis de fachada, fadiga, ações monotónicas

ABSTRACT

Over the last years we have been assisted to a remarkable growing use of prefabricated facades in civil engineering. In this context, GRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) has been used more and more, which has assumed a vital role due to its countless advantages. This composite that consists in a dispersion of fiberglass into cement mortar shows some characteristics ranging from low weight and versatility to high levels of performance.

This project presents a study carried out with the use of facade panels in GRC, whose main goal was to characterize its performance under monotonic and cyclical actions. In general terms, from the consulted bibliography, it was taken into account the principal and most relevant aspects to be handled for this study. Hence, with the objectives already defined, the tests to be experimented were studied and in a final stage, the obtained results were then interpreted.

Regarding the facade panels, the GRC is subject to lots of actions that can affect its performance and properties. In addition to the material in itself, it's also important to understand the way how the element is linked to the structure, that is, to know the fixing system. Therefore, lab tests were done which in several and different ways could deal with the principal and meaningful standards for this study. The experimented campaigns were carried out under a monotonic feature, in which panels in a great scale, as well as test specimens of the same material and also similar test specimens of cyclical character were tested. The monotonic tests consisted in tests related to the global function of the panels with distributed loads and tests to the flexing of GRC. Concerning the cyclical tests, it was developed a methodology that initially consisted in a monotonic standard, followed by a repeated action of cyclic loads in the same test specimens until rupture by fatigue.

From the result, it was possible to present through several patterns, the most relevant printings of the two kinds of performance with akin analogies. The discussion of the results helped not only come to a conclusion over the general function of the panel and the fixing system, but also the GRC performance when subject to growing static load conditions or cyclical load.

Through the testing of the global function it was tested the mechanical behaviour of the study panel and its fixings from the application of linear loads. The defined loading for the test set allowed simulate the real panel subjected to a uniformly distributed load. Thus, it was possible to evaluate the resistant capacity of the panel in the mid-span area and the strength capacity of the fixing system.

The tests to flexing resistance of the GRC allowed to characterize the resistance to increasing loads in a monotonic way and evaluate the mechanical performance of the material. Through this test, it was evaluated the feasibility of using the videogrammetry technique for measuring any strains.

The cyclical tests allowed to understand and describe the GRC performance when subject to repetitive loads. Based on these studies, it was possible to compare the results with the data available in the literature consulted on the fatigue strength of GRC.

Finally, from the whole set of tests it was then possible to reach the major goals and get a better information about the function of a facade panel when subject to different sorts of actions.

KEYWORDS: GRC, glass fibre, facade panels, fatigue, monotonic actions

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS DA TESE.....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO	3
2 PAINÉIS DE FACHADA EM GRC.....	5
2.1. GRC.....	5
2.1.1. DESCRIÇÃO GERAL.....	5
2.1.2. PROCESSOS DE PRODUÇÃO.....	6
2.1.3. APLICAÇÕES.....	8
2.2. TIPOS DE PAINÉIS	10
2.2.1. PAINEL “SINGLE SKIN”.....	10
2.2.2. PAINEL NERVURADO.....	11
2.2.3. PAINEL “STUD FRAME”	11
2.2.4. PAINEL “SANDWICH”	12
2.3. TIPOS DE FIXAÇÃO.....	13
2.3.1. FIXAÇÕES ENCAPSULADAS	14
2.3.2. FIXAÇÕES LIGADAS COM ALMOFADA	15
2.3.3. FIXAÇÕES SECUNDÁRIAS	16
2.3.4. DIMENSIONAMENTO DAS FIXAÇÕES	16
3 COMPORTAMENTO MONOTÓNICO E CÍCLICO DO GRC	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. COMPORTAMENTO MONOTÓNICO	17
3.2.1. DIAGRAMAS TENSÃO-EXTENSÃO EM COMPRESSÃO, TRAÇÃO E FLEXÃO.....	17
3.2.2. ENVELHECIMENTO DO GRC	20
3.2.3. ENVELHECIMENTO DOS PAINÉIS DE FACHADA EM GRC.....	21
3.3. COMPORTAMENTO CÍCLICO E FADIGA.....	22
4 CASO DE ESTUDO	31

4.1. INTRODUÇÃO	31
4.2. PAINEL.....	31
4.2.1. AÇÕES ATUANTES NUM PAINEL REAL E FUNCIONAMENTO ESTRUTURAL	36
4.3. PLACAS EM GRC.....	36
5 ENSAIOS LABORATORIAIS	39
5.1. OBJETIVOS.....	39
5.2. ENSAIOS DO FUNCIONAMENTO GLOBAL DO PAINEL	39
5.2.1. ENSAIO PRELIMINAR.....	39
5.2.2. ENSAIOS COM QUATRO PONTOS DE APLICAÇÃO DE CARGA.....	44
5.3. ENSAIOS MONOTÓNICOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC.....	48
5.3.1. SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VIDEOGRAMETRIA.....	49
5.3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	51
5.4. ENSAIOS CÍCLICOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC.....	55
6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	59
6.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MONOTÓNICO	59
6.1.1. RESULTADOS DO ENSAIO DO FUNCIONAMENTO GLOBAL DO PAINEL.....	59
6.1.2. RESULTADOS DO ENSAIO COM QUATRO PONTOS DE APLICAÇÃO DE CARGA	61
6.1.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC	68
6.1.4. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS.....	80
6.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO CÍCLICO.....	81
6.2.1. CAMPANHA EXPERIMENTAL DA PLACA 2	82
6.2.2. CAMPANHA EXPERIMENTAL DA PLACA 3	84
6.2.3. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS	85
7 CONCLUSÕES.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de fachada de um edifício em GRC (Rider).....	6
Figura 2.2 - Pistola utilizada nos painéis de estudo (Tavares 2014)	7
Figura 2.3 – Revestimento de edifício em GRC (GRCA International 2003).....	8
Figura 2.4 – Reabilitação de edifício com GRC (GRCA International 2003)	8
Figura 2.5 – Revestimento arquitetónico com GRC (Global Composite)	9
Figura 2.6 – Exemplo de aplicação de GRC em mobiliário urbano (Global Composite).....	9
Figura 2.7 - Barreira acústica em GRC (Global Composite).....	9
Figura 2.8 - Cofragem permanente em GRC (GRCA International 2003)	9
Figura 2.9 - Tipo de painéis <i>single skin</i> (adaptado de (GRCA International 2005))	10
Figura 2.10 - Painel nervurado (GRCA International 2005)	11
Figura 2.11 – Construção <i>stud-frame</i> fabricada a partir de secções retangulares ocas (GRCA International 2005)	11
Figura 2.12 – Ancoragens flexíveis (GRCA International 2005)	12
Figura 2.13 – Ancoragens de gravidade ou suporte (GRCA International 2005)	12
Figura 2.14 - Painel <i>sandwich</i> (Tavares 2014)	13
Figura 2.15 - Tipo de fixação utilizada para um painel nervurado ou para um painel do tipo <i>stud-frame</i> , (adaptado de (Vetrotex 1998))	14
Figura 2.16 - Fixação encapsulada, adaptado de (GRCA International 2005)	15
Figura 2.17 - Fixação com ancoragem flexível (GRCA International 2005)	15
Figura 3.1 - Curva tensão-extensão do GRC em compressão (adaptado de (Vetrotex 1998))	18
Figura 3.2 – Curva tensão – extensão do GRC em tração, do tipo A (adaptado de (Vetrotex 1998)) .	18
Figura 3.3 – Curva tensão – extensão do GRC em tração, do tipo B(adaptado de (Vetrotex 1998)) ..	18
Figura 3.4 – Curva de compressão, tração e flexão do GRC (adaptado de (Vetrotex 1998))	19
Figura 3.5 – Evolução do parâmetro MOR, tendo em conta o envelhecimento do GRC (adaptado de (Vetrotex 1998)).....	21
Figura 3.6 – Evolução dos parâmetros LOP e MOR (Tavares 2014)	22
Figura 3.7 – Diagramas tensão/extensão (Tavares 2014).....	22
Figura 3.8 - Tipos de carregamento à fadiga (adaptado de (Seitl et al. 2009))	23
Figura 3.9 – Curva S-N do GRC à compressão (adaptado de (Lee e Barr 2004)).....	24
Figura 3.10 – Curva S-N do GRC à flexão (adaptado de (Lee e Barr 2004)).....	24
Figura 3.11 – Diagrama carga-deflexão das amostras sob ensaio monotónico (adaptado de (Seitl et al. 2013))	26

Figura 3.12 - Diagrama tensão/número de ciclos em escala logarítmica (adaptado de (Seitl et al. 2013)).....	27
Figura 3.13 – Curvas S-N das cinco amostras (adaptado de (Seitl et al. 2013)).....	27
Figura 3.14 – Comportamento cíclico de uma amostra de GRC (adaptado de (Vetrotex 1998)).....	28
Figura 3.15 - Resultados do ensaio cíclico com extensões positivas tensão/extensão (Ferreira 2001)	29
Figura 3.16 - Variação da rigidez durante os ensaios cíclicos com extensões positivas (Ferreira 2001)	29
Figura 3.17 - Ensaio de compressão cíclica de um provete cilíndrico. Extensão global (Ferreira 2001)	30
Figura 4.1 - Modelo do painel em 3D	32
Figura 4.2 - Secção transversal do painel (corte horizontal da lâmina em GRC)	32
Figura 4.3 – Secção transversal do painel e estrutura metálica	32
Figura 4.4 – Corte da secção transversal da Figura 4.3 (dimensões em m)	33
Figura 4.5 - Planta do painel. Localização das ligações aparafusadas (dimensões em m)	33
Figura 4.6 - Painel em estudo (armazenado na posição horizontal).....	34
Figura 4.7 - Estrutura metálica de suporte: pilar e perfil tubular	34
Figura 4.8 – Molde metálico utilizado na produção dos painéis (Tavares 2014).....	36
Figura 5.1 - Vista lateral do esquema do ensaio preliminar (dimensões em m).....	40
Figura 5.2 – Corte A-A da Figura 5.1. Vista superior do esquema de ensaio (dimensões em m).....	41
Figura 5.3 - Corte B-B da Figura 5.2 (dimensões em m)	41
Figura 5.4 - Carga distribuída no painel real	42
Figura 5.5 – Distribuição de forças equivalente no painel de ensaio	42
Figura 5.6 - Diagrama de momentos para a Figura 5.6	42
Figura 5.7 - Carga uniformemente distribuída.....	43
Figura 5.8 - Distribuição de cargas considerada no ensaio laboratorial	43
Figura 5.9 – Ligação entre o perfil metálico em forma de losango e o pórtico de reação	43
Figura 5.10 - Atuador utilizado para o ensaio.....	44
Figura 5.11 - Vista lateral do esquema de ensaio (dimensões em m).....	45
Figura 5.12 – Corte A-A da Figura 5.10. Vista superior do esquema de ensaio (dimensões em m)....	45
Figura 5.13 - Corte B-B da Figura 5.12 (dimensões em m)	46
Figura 5.14 – Carga distribuída no painel real	46
Figura 5.15 - Distribuição de forças no painel de ensaio	46
Figura 5.16 - Diagrama de momentos para a Figura 5.15	47
Figura 5.17 - Posicionamento dos LVDTs em planta no painel	48

Figura 5.18 - - LVDTs utilizados no ensaio, na posição P3 e P4.....	48
Figura 5.19 - Marcação do provete a partir da grelha.....	50
Figura 5.20 - Provete marcado.....	50
Figura 5.21 - Sub-rotina da correção da distorção.....	51
Figura 5.22 - Marcação dos provetes de acordo com a norma	52
Figura 5.23 - Provetes retirados da placa	52
Figura 5.24 – Esquema do ensaio de resistência à flexão do GRC utilizado.....	53
Figura 5.25 - Equipamento de filmagem e aquisição de vídeo durante o ensaio de resistência à flexão do GRC.....	54
Figura 5.26 - Diagrama carga/deformação (IPQ 2000)	54
Figura 5.27 - Ensaio monotónico sobre o provete de GRC até um deslocamento pré-definido	56
Figura 5.28 – Ensaio cíclico sobre o provete de GRC	56
Figura 5.29 - Provete 2T2 a ser ensaiado ciclicamente.....	57
Figura 5.30 - Rotura do provete 2T2 por carregamento cíclico	57
Figura 6.1 - Ensaio preliminar do painel P1	59
Figura 6.2 – Abertura da fenda próximo do ponto de carga direito	60
Figura 6.3 – Modo de rotura do painel	60
Figura 6.4 - Diagrama momento fletor máximo/deslocamento para o painel P1	60
Figura 6.5 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P2	62
Figura 6.6 - Deslocamentos registados pelos LVDTs P1 e P5.....	62
Figura 6.7 - Deslocamentos registados pelos LVDTs P2 e P6.....	62
Figura 6.8 - Fissura que determinou a rotura no painel P2	63
Figura 6.9 – Fenda que determinou a rotura no painel P2	63
Figura 6.10 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P3	64
Figura 6.11 – Fendas na nervura lateral do painel P3.....	65
Figura 6.12 – Detalhe da fenda que determinou a rotura na lâmina inferior do painel P3	65
Figura 6.13 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P4	66
Figura 6.14 – Fendas na nervura lateral do painel P4.....	66
Figura 6.15 – Detalhe da fenda que determinou a rotura na lâmina inferior do painel P4	67
Figura 6.16 - Diagramas tensão - extensão para a primeira campanha experimental de ensaios de flexão do GRC.....	69
Figura 6.17 - Zona central do provete marcada com 20 alinhamentos	70
Figura 6.18 - Zona central do provete marcada com 10 alinhamentos	70
Figura 6.19 - Zona central do provete marcada com 5 alinhamentos	70

Figura 6.20 – Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1B1 para 10 posições	71
Figura 6.21 – Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1B3 para 10 posições	71
Figura 6.22 - Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1T1 para 10 posições	71
Figura 6.23 - Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1T2 para 10 posições	71
Figura 6.24 - Rotura do provete 1T2	72
Figura 6.25 – Rotura do provete 1B1	72
Figura 6.26 - Rotura do provete 1B3	72
Figura 6.27 - Rotura do provete 1T1	73
Figura 6.28 - Diagramas tensão - extensão para as 20 posições do provete 1T2	73
Figura 6.29 - Diagramas tensão - extensão para as 10 posições do provete 1T2	74
Figura 6.30 - Diagramas tensão - extensão para as 5 posições do provete 1T2	74
Figura 6.31 - Rotura do provete 1T2	75
Figura 6.32 - Curvas extensão - posição para o provete 1B1	76
Figura 6.33 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1B1, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)	76
Figura 6.34 - Curvas extensão - posição para o provete 1B3	77
Figura 6.35 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1B3, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)	77
Figura 6.36 - Curvas extensão - posição para o provete 1T1	78
Figura 6.37 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1T1, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)	78
Figura 6.38 - Curvas extensão - posição para o provete 1T2	79
Figura 6.39 - Representação das curvas ocorridas no provete 1T2, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)	79
Figura 6.40 – Fendas horizontais entre a lâmina inferior e a nervura vertical	81
Figura 6.41 – Série de provetes da placa 2 após a rotura no ensaio cíclico	82
Figura 6.42 - Curvas extensão máxima - número de ciclos dos provetes da placa 2	83
Figura 6.43 - Série de provetes da placa 3 após rotura no ensaio cíclico	84
Figura 6.44 - Rotura do provete 3B1 da placa 3	84
Figura 6.45 - Curvas extensão máxima - número de ciclos dos provetes da placa 3	84
Figura 6.46 - Diagrama de Wöhler para os provetes da placa 2 e da placa 3	85
Figura 6.47 – Curva S-N da amostra HD 080326 e níveis de tensão/número de ciclos para as duas séries experimentais	87
Figura 6.48 – Diagramas tensão/extensão da placa 1 e extensões características da placa 2	88
Figura 6.49 - Diagramas tensão/extensão da placa 1 e extensões características da placa 3	88

Figura 6.50 – Diagramas tensão/extensão da placa 1 e curva média dos resultados	89
Figura 6.51 – Envolvente de flexão nos ensaios cíclicos da placa 2	90
Figura 6.52 – Envolvente de flexão nos ensaios cíclicos da placa 3	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades das amostras ensaiadas (Seitl et al. 2013)	25
Tabela 4.1 - Datas de moldagem e de ensaio dos painéis em estudo	35
Tabela 4.2 - Data de moldagem e data de ensaio das placas de GRC.....	37
Tabela 5.1 - LVDTs utilizados para a medição de deslocamentos durante o ensaio.....	47
Tabela 5.2 - Provete submetidos ao ensaio monotónico de resistência à flexão do GRC	49
Tabela 5.3 - Comprimento dos provetes em função da espessura (IPQ 2000)	52
Tabela 5.4 - Afastamento entre apoios em função do comprimento do provete (IPQ 2000)	53
Tabela 5.5 - Provete submetidos ao ensaio cíclico.....	55
Tabela 6.1 - Momento máximo na rotura e tensão máxima de tração para cada painel.....	68
Tabela 6.2 - Extensão ($m\epsilon$); Tensão (MPa)	69
Tabela 6.3 - Média de tensões e extensões	69
Tabela 6.4 - Parâmetros do ensaio cíclico da placa 2	81
Tabela 6.5 – Parâmetros do ensaio cíclico da placa 3	82
Tabela 6.6 - Extensões máximas e número médio de ciclos para cada provete da placa 2.....	83
Tabela 6.7 - Dados dos diagramas extensão máxima/número de ciclos	85
Tabela 6.8 - Níveis de tensão S para os provetes da placa 1	86
Tabela 6.9 - Extensão ϵ_c para cada nível de tensão S.....	87

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O cimento reforçado com fibras de vidro (GRC) tem sido amplamente empregue, recentemente, na construção de painéis pré-fabricados para revestimento de fachadas. A aplicação desses painéis em situações onde a estrutura de revestimento está sujeita a esforços relevantes, é dificultada pela escassez de documentos normativos que definam: (i) propriedades mecânicas para o GRC aplicado a painéis de fachada; (ii) procedimentos de controlo para garantir que o material empregue numa determinada aplicação possui as características previstas em fase de projeto; (iii) procedimentos de análise do comportamento mecânico de painéis sujeitos a esforços relevantes, quer com carácter monotónico, quer com carácter cíclico.

Com a cooperação de uma empresa com experiência na produção de elementos em GRC, a Mota - Engil – Engenharia e Construção, foram levados a cabo trabalhos que pretendem contribuir para o conhecimento acerca do comportamento de painéis de fachada construídos com este material, em situações onde esses elementos são sujeitos a esforços relevantes, monotonicamente crescentes ou de natureza cíclica. Num primeira fase, foram realizados trabalhos para caracterização da influência do envelhecimento sobre o comportamento mecânico deste material (Tavares 2014). O presente trabalho deu continuidade a essa cooperação, incidindo sobre a avaliação do comportamento resistente de painéis do tipo *sandwich*, suportados por uma estrutura metálica em perfis tubulares, e ainda sobre o aprofundamento do conhecimento sobre o comportamento mecânico do GRC.

1.2. OBJETIVOS DA TESE

Os elementos de revestimento de fachadas realizados com elementos pré-fabricados em GRC podem assumir formas muito diversas e ser ligados à respetiva estrutura de suporte através de múltiplas alternativas. Com o presente trabalho, pretende-se contribuir para o conhecimento sobre o comportamento mecânico de um tipo específico de painel, cuja geometria, material e tipo de fixação foram concebidos pela Mota - Engil – Engenharia e Construção. Em particular, pretende-se testar em laboratório, em ensaios à escala real, o comportamento mecânico do painel e das suas fixações, para cargas laterais, uniformemente distribuídas, provenientes da ação do vento. Para além do ensaio de painéis à escala real, pretende-se ainda realizar ensaios de flexão em provetes de GRC de reduzida dimensão (vão do provete de ensaio igual a 30 cm), que por serem mais simples podem ser repetidos mais vezes, permitindo caracterizar melhor aspetos específicos do comportamento mecânico do GRC.

Atendendo aos objetivos do trabalho, foi inicialmente realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o material GRC, sobre as suas propriedades, sobre a sua produção, e sobre as suas aplicações. Tendo em

conta o foco em painéis de fachada, foram estudadas as tipologias mais comuns para painéis de fachada e as soluções mais comuns para as estruturas de fixação.

Considerando que se pretendia ter em conta o comportamento resistente dos painéis sujeitos à ação do vento, que é uma ação ciclicamente repetida, a pesquisa bibliográfica incidiu também sobre o comportamento cíclico do GRC, isto é, sobre a sua resistência à fadiga.

Posteriormente foi planeada uma campanha de ensaios laboratoriais, tendo necessariamente em conta as limitações relacionadas com o tempo e os meios disponíveis para a realização da dissertação. Assim, definiu-se que seriam ensaiados quatro painéis à escala real, constituindo o primeiro um ensaio preliminar destinado a fornecer indicações que permitissem ajustar com mais rigor as características dos ensaios definitivos (em três painéis, portanto). Com os ensaios de painéis à escala real pretendia-se simular o seu comportamento resistente quando sujeitos a cargas laterais provenientes da ação do vento. Numa situação real, os painéis são dispostos na vertical, e a ação do vento que se pretende simular atua na direção horizontal. Ora, não sendo esta disposição conveniente para ensaios laboratoriais, pretende realizar os ensaios com o painel disposto num plano horizontal, sendo a carga aplicada segundo a direção vertical, por um atuador servo-hidráulico, e repartida através de uma estrutura de distribuição de forças. Não sendo praticável aplicar, em laboratório, uma carga uniformemente distribuída, foi decidido aplicar a carga, nos ensaios definitivos, através de quatro cargas lineares. Esse carregamento foi definido de modo a que a relação entre o momento fletor máximo e o esforço transversal máximo seja igual à relação que se verifica num painel real sujeito a uma carga uniformemente distribuída. Assim, pretende-se avaliar quer o comportamento resistente do painel na zona de meio vão (condicionado essencialmente, nos ensaios realizados, pelo valor do momento fletor atuante), quer o comportamento resistente das fixações à estrutura metálica de apoio. Atendendo às restrições a que um trabalho desta natureza está sujeito, verificou-se não ser possível realizar ensaios cíclicos em painéis à escala real. No entanto, concluiu-se que os ensaios com carregamento monotónico podem por si só fornecer indicações muito importantes, atendendo à escassez de documentos normativos de apoio à conceção e análise deste tipo de elementos construtivos.

Não sendo possível, realizar ensaios cíclicos em painéis à escala real, pretende-se estudar o comportamento cíclico do material através de ensaios de flexão em provetes com 30 cm de vão, com configuração análoga aquela sugerida pela norma NP EN 1170-5. Estes ensaios cíclicos não devem ser encarados como uma campanha completa de ensaios que permita caracterizar de um modo exaustivo o comportamento cíclico do material empregue no fabrico dos painéis testados. Devem sim ser considerados ensaios exploratórios que permitam avaliar, por um lado, a viabilidade do esquema de ensaio adotado e, por outro lado, forneçam indicações que possam ser confrontadas com os dados disponíveis na bibliografia sobre a resistência à fadiga do GRC.

Finalmente, atendendo ao carácter laboratorial da presente dissertação, foi estabelecido outro objetivo específico para a presente dissertação: avaliação da possibilidade de usar a correlação digital de imagens para medir extensões e curvaturas locais nos ensaios de flexão dos provetes de GRC com 30 cm de vão.

Numa primeira fase, procurou-se compreender as características resistentes do material, relevantes em painéis de fachada, passando pela análise do painel de estudo e pela forma como este vai ser ligado à restante estrutura. Com base nesta apreciação, foram estabelecidos os aspetos mais interessantes a abordar sobre o tema e o tipo de ensaios a realizar.

Seguidamente, foi concebida uma campanha de ensaios laboratoriais monotónicos e cíclicos, para caracterizar o comportamento do painel e do próprio GRC.

Por fim, através da análise dos resultados obtidos, procedeu-se ao tratamento de dados de modo a traduzir, da melhor forma, o comportamento resistente do GRC e da estrutura painel e fixação, depois comparado com a bibliografia consultada.

A partir desta investigação, o objetivo principal é caracterizar o comportamento sob ações estáticas crescentes e sob ações cíclicas repetidas do betão reforçado com fibras de vidro, aplicado ao caso de um painel de fachada. Este estudo passa não só por compreender o comportamento do material mas, também, o próprio funcionamento do painel que apresenta algumas particularidades no seu conjunto, como é o caso da fixação. Ao mesmo tempo, procurou-se encontrar as melhores formas de exprimir os resultados obtidos e estudou-se a viabilidade e interesse em utilizar a técnica de videogrametria nas campanhas experimentais.

1.3. ORGANIZAÇÃO

A dissertação encontra-se estruturada em 7 capítulos.

No primeiro capítulo, é apresentado um enquadramento do tema do trabalho, sendo portanto de carácter introdutório aos restantes capítulos que se seguem.

No capítulo 2, apresenta-se a pesquisa realizada sobre o GRC, suas características, propriedades, vantagens e exemplos de aplicação. Focando depois nos painéis em GRC, apresentam-se os principais tipos de painéis utilizados e fixações mais correntes.

No capítulo 3, é abordada a pesquisa sobre o comportamento monotónico e cíclico do GRC. Ao longo do capítulo, são descritas as principais conclusões relativas ao comportamento monotónico, ressaltando os aspetos mais importantes a considerar, e ainda as conclusões do estudo sobre o comportamento cíclico. A par desta investigação, é também abordado o problema do envelhecimento, um aspeto relevante para o estudo do GRC.

O caso em estudo é abordado no capítulo 4. Neste, apresenta-se uma descrição dos elementos a ensaiar, nomeadamente o painel e as placas de GRC. É descrita a solução do painel em causa e são apresentadas as suas características principais.

No capítulo 5, são descritas as campanhas de ensaios realizadas. Primeiramente, são descritos os ensaios de carácter monotónico, do painel e das placas de GRC e, depois, são descritos os ensaios cíclicos, também das placas de GRC. São representados os esquemas de ensaio e respetivas metodologias.

Os resultados e a sua análise são representados, comentados e discutidos no capítulo 6.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões retiradas deste estudo, acompanhadas por uma análise global do trabalho desenvolvido.

2 PAINÉIS DE FACHADA EM GRC

2.1. GRC

2.1.1. DESCRIÇÃO GERAL

O betão reforçado com fibras de vidro (“GRC” – “*Glass Fibre Reinforced Concrete*” ou “*Glass Fibre Reinforced Cement*”) é um material compósito cimentício, constituído por uma mistura de cimento, água, areia de sílica, aditivos e fibras de vidro, de pequeno comprimento, dispersas pela matriz (cerca de 2,5 a 5 %). A presença de fibras manifesta-se, essencialmente, no aumento significativo da resistência inicial à tração, flexão e ao impacto, uma vez que contribui para limitar o aparecimento e propagação de fendas.

O GRC surgiu nos anos 70 e, desde então, tem sido amplamente utilizado na arquitetura e engenharia civil. Pela mesma altura, surgiram também outro tipo de compósitos de argamassas de cimento reforçado com fibras, normalmente designados por FRC (“*Fiber reinforced cement*” ou “*Fibre Reinforced Concrete*”), onde as funções das fibras são garantir o controlo da fendilhação, aumentando a resistência mecânica dos compósitos. Para além das fibras de vidro, atualmente são também utilizadas fibras de aço e de carbono, para reforçar diferentes materiais, tais como resinas epóxi, plásticos ou materiais cerâmicos. (Ferreira 2001, Tavares 2014).

As propriedades do GRC resultam da combinação de diferentes combinações de materiais. A composição da matriz, grau de compactação, tipo de cimento e proporção, o tipo, orientação e comprimento das fibras, os aditivos usados, são alguns dos fatores que influenciam o resultado obtido, pelo que o GRC pode ser adaptado às necessidades específicas de uma determinada aplicação. Outro aspeto com relevância para as propriedades do compósito é o processo de fabrico, como se vai mostrar à frente.

Tendo em conta as suas características, o GRC é, habitualmente, usado para fins não estruturais, sobretudo em peças pré-fabricadas, como painéis de fachada, tirando partido do baixo peso dos elementos (Figura 2.1). De facto, na pré-fabricação de betão reforçado com fibras de vidro tira-se partido da flexibilidade que este material apresenta quanto à geometria do produto final e da significativa redução de peso das peças, comparativamente às restantes alternativas com betão pré-fabricado. Com efeito, é possível a produção de elementos com espessuras reduzidas devido à elevada resistência à flexão atribuída pelas fibras e devido à ausência de agregados grossos na sua composição.

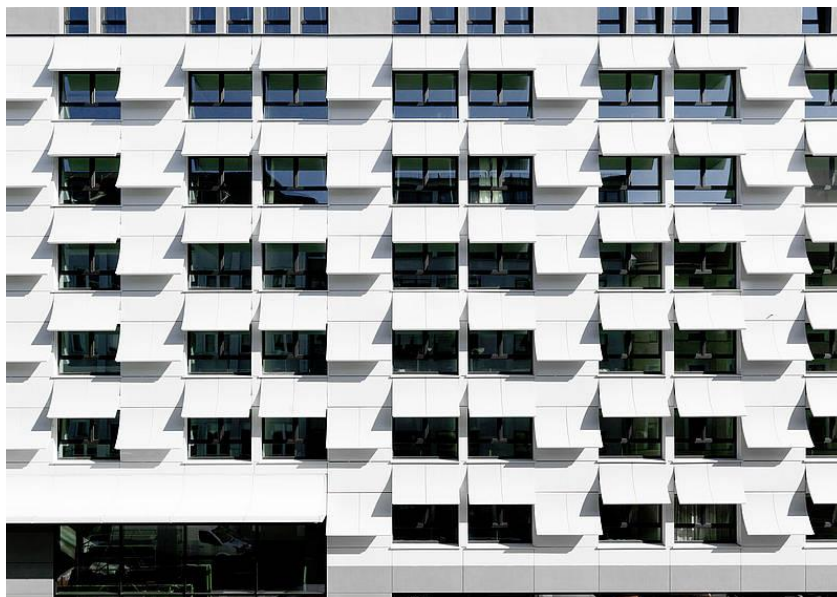


Figura 2.1 – Exemplo de fachada de um edifício em GRC (Rider)

A redução de peso dos componentes permite que os painéis sejam mais facilmente manipulados, permitindo reduzir custos a nível do manuseamento, transporte e montagem.

Para além desta vantagem, o GRC é também um material que apresenta vantagens como a elevada durabilidade (não sofre corrosão por não incorporar armaduras em aço), flexibilidade, permitindo a criação de formas mais complexas, resistência química, resistência ao fogo (é feito de materiais inorgânicos) e bom isolante térmico e acústico. No que toca às desvantagens do GRC comparativamente ao betão, os custos de produção iniciais são elevados uma vez que existe a necessidade de equipamentos específicos e formação de trabalhadores (GRCA International 2005), (Ferreira 2001).

2.1.2. PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Entre os métodos de fabrico do GRC, são descritos os dois mais comuns: o método *spray-up* e o método *premix*. Para além destes, existem outras alternativas de produção que, apesar de menos utilizadas, apresentam vantagens em relação a estes dois, mas que não serão desenvolvidos. O equipamento utilizado consta, basicamente, numa misturadora e numa pistola de projecção.

O método *spray-up* consiste na projecção simultânea da argamassa de cimento e das fibras de vidro contra o molde da peça a fabricar, através de uma pistola especial. Esta pistola de projecção especial, alimentada por um cordão, pode ser de cabeças gémeas ou de cabeça concêntrica. No caso de ser de cabeças gémeas, a pistola dispõe de duas cabeças em que uma delas projeta a argamassa contra o molde e a outra projeta as fibras contra a argamassa - a mistura dá-se no exterior do aparelho; no segundo caso, na pistola de cabeça simples, o processo é semelhante ao da pistola de duas cabeças, no entanto, a mistura dá-se no interior do dispositivo. Na Figura 2.2 é apresentada a pistola utilizada no fabrico dos painéis estudados neste trabalho.



Figura 2.2 - Pistola utilizada nos painéis de estudo (Tavares 2014)

O processo *spray-up* é dividido em três etapas: fabrico da argamassa, projeção e compactação. A argamassa é preparada numa central própria e, posteriormente, é passada para um dispositivo de bombagem peristáltica que garante a alimentação da pistola de projeção.

O fabrico de peças em GRC é, normalmente, executado repetindo as três etapas até ser obtida a espessura pretendida, para que seja garantido um grau adequado de compactação do produto. Inicialmente, deve ser projetada uma camada de argamassa simples, sem fibras, com uma espessura de aproximadamente 1 a 2 mm, para garantir a ausência de fibras na face da peça. A projeção do GRC deve ser efetuada logo de seguida. Passada esta fase, é realizada a compactação através de um rolo de forma a assegurar a compacidade do compósito e a impregnação das fibras na argamassa. Esta deve ser feita a cada 3 a 4 mm de material projetado. Após esta operação, é verificada a espessura do produto através de uma agulha que serve de bitola.

O processo de *spray-up* pode ser manual, parcial ou integralmente mecanizado e o ritmo de produção de GRC apresenta valores de aproximadamente 10 a 12 Kg por minuto, podendo-se integrar uma quantidade de fibras de cerca de 5 % relativamente ao peso total do material. Com este método, é possível obter elevada uniformidade e orientação das fibras no plano dos moldes, distribuição bidimensional e painéis com formas geométricas complexas. No entanto, o método é exigente em termos de mão-de-obra. O fabrico de GRC envolve, geralmente, a produção de quantidades significativas de peças iguais ou do mesmo género. Deste modo, deve ser realizado um estudo prévio no que respeita a determinação de uma composição otimizada, assegurando-se as melhores condições de produção e a melhor qualidade possível para o produto final.

Alguns dos produtos típicos resultantes deste processo são, por exemplo: painéis de fachada, barreiras acústicas, rochas artificiais, canais para escoamento de águas e elementos de revestimento de tetos e paredes (GRCA International 2005),(Ferreira 2001),(Tavares 2014).

O processo *premix* consiste numa mistura inicial dos materiais que constituem a argamassa, à qual é adicionada depois, na misturadora, as fibras de vidro. Desta forma, o GRC é produzido em duas etapas distintas. Na primeira fase é produzida a argamassa, constituída por cimento, água, areia e aditivos, e na

segunda fase são incorporadas as fibras, dispersas de forma uniforme, manual ou automaticamente. Dada a fragilidade das fibras, uma das dificuldades inerentes a este método é o cuidado necessário para evitar a danificação das mesmas durante a mistura. A relação areia:cimento encontra-se, tipicamente, no intervalo de 0.5:1 a 0.7:1 e a relação de água:cimento, normalmente, inferior a 0.35. Em relação à quantidade de fibras, a quantidade aproximada é, geralmente, de 3-4 %, em termos de peso total do produto, sendo o seu comprimento da ordem dos 12 mm.

Na fase de moldagem, procede-se ao enchimento do molde através do vazamento simples ou de bombagem da mistura de GRC. Os moldes podem ser simples ou compostos por molde e contra - molde. Por fim, realiza-se uma vibração de modo a garantir um escoamento do material e a libertação de ar do interior.

Com o método *premix* é difícil obter uma dispersão uniforme das fibras de vidro ao longo da matriz, uma vez que a distribuição é feita tridimensionalmente, em que muitas fibras não se distribuem espacialmente no plano de atuação de forças. Contudo, é um processo versátil e que permite o fabrico de peças pequenas de arquitetura em períodos de tempo mais reduzidos a partir da utilização de vários moldes. Alguns dos produtos que podem resultar deste processo são: barreiras acústicas, painéis para parede divisórias, canais de drenagem, palas solares, entre outros.

2.1.3. APLICAÇÕES

O GRC é um dos materiais mais versáteis para a engenharia civil e arquitetura, permitindo várias aplicações e servindo como alternativa a outros materiais mais tradicionais. Pode ser moldado dentro de uma vasta gama de formas e perfis complexos, com bons acabamentos, e é largamente empregue em painéis de revestimento leves no exterior de edifícios modernos. Como já foi mencionado anteriormente, a principal vantagem do GRC, relativamente às outras alternativas de betão pré-fabricado, é a considerável redução do peso das peças. Este aspeto pode levar a poupanças significativas nos custos de transporte, manuseamento e montagem dos painéis. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de revestimento de um edifício com GRC e a Figura 2.4 mostra a utilização de GRC aplicado à reabilitação.



Figura 2.3 – Revestimento de edifício em GRC (GRCA International 2003)



Figura 2.4 – Reabilitação de edifício com GRC (GRCA International 2003)



Figura 2.5 – Revestimento arquitetónico com GRC (Global Composite)



Figura 2.6 – Exemplo de aplicação de GRC em mobiliário urbano (Global Composite)

A Figura 2.5 apresenta outro exemplo da aplicabilidade do GRC, neste caso, na arquitetura. Na Figura 2.6 é apresentada uma aplicação do GRC em mobiliário urbano. A Figura 2.7 mostra uma barreira acústica feita em GRC.

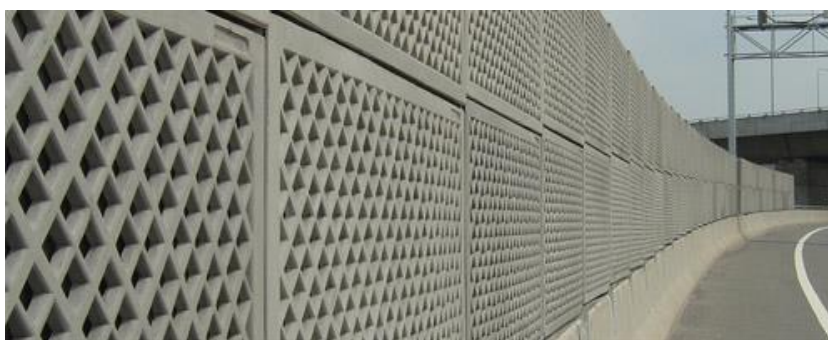


Figura 2.7 - Barreira acústica em GRC (Global Composite)

Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de utilização do GRC para cofragem permanente.



Figura 2.8 - Cofragem permanente em GRC (GRCA International 2003)

2.2. TIPOS DE PAINÉIS

A fase de projeto, antes do início do fabrico dos painéis, envolve um conjunto de etapas, nomeadamente o estudo das diretrizes do projeto, a geometria e modulação e, com base nestas informações, a definição do tipo de painel mais adequado para a construção. O projeto de painéis em GRC baseia-se nas propriedades do material, na sua alteração ao longo da vida útil e do seu desempenho em condições variadas.

A produção de painéis em GRC foi primeiramente utilizada em Inglaterra, como extensão dos estudos realizados sobre a adição de fibras de vidro alcalino-resistentes. A forma mais simples dos painéis consiste numa única lâmina, designada por *single skin*, normalmente com uma espessura de 10 a 15 mm. Contudo, dependendo dos esforços atuantes, pode ser necessária uma espessura maior ou até a utilização de reforços.

A menos que o painel tenha, por si só, uma forma que contribua para a sua rigidez e resistência, as propriedades do GRC ditam a conceção de soluções construtivas que aumentem a capacidade resistente de painéis, a partir de métodos como a criação de nervuras na parte de trás do painel através da projeção de GRC, a conceção de dobras voltadas ao longo dos bordos para a parte de trás do painel, a criação de estruturas *sandwich* ou pela criação de estruturas constituídas por painéis e por pórticos metálicos (GRCA International 2005).

2.2.1. PAINEL “SINGLE SKIN”

Os painéis *single skin* apresentam formas capazes de conferir rigidez e resistência, com uma única lâmina de GRC que aumenta de espessura nas vizinhanças das fixações. O seu peso varia, usualmente, entre 30 Kg/m² e 45 Kg/m². É um modelo económico e simples para construção de painéis pequenos e com forma. É principalmente utilizado para placagem. Na Figura 2.9 são apresentados alguns exemplos dos tipos de painéis *single skin*.

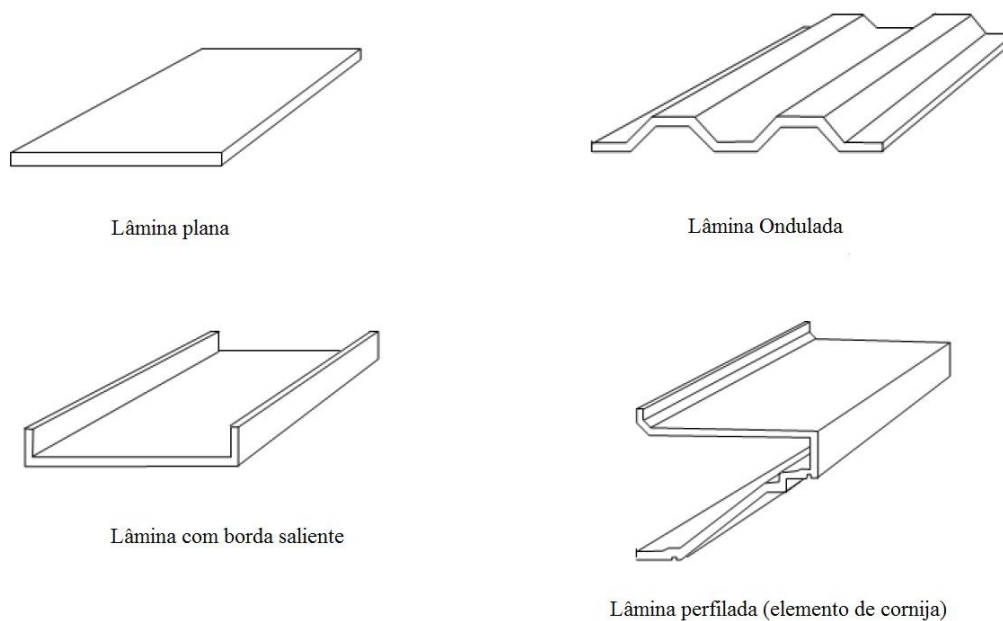


Figura 2.9 - Tipo de painéis *single skin* (adaptado de (GRCA International 2005))

2.2.2. PAINEL NERVURADO

O painel nervurado ou painel individual com nervuras é um modelo constituído por uma malha de nervuras, de modo a garantir inércia e resistência suficientes. É utilizado para fabricar painéis mais largos, sem utilização do modelo *stud frame*. Estas nervuras são efetuadas a partir da projeção de GRC em moldes, normalmente de poliestireno ou com um elemento de GRC pré-fabricado. A Figura 2.10 apresenta um modelo de um painel deste género.

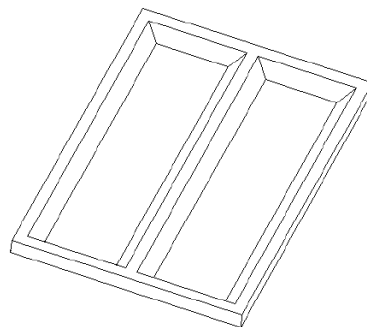


Figura 2.10 - Painel nervurado (GRCA International 2005)

2.2.3. PAINEL “STUD FRAME”

Este modelo de painel é composto por uma lâmina de GRC que incorpora uma estrutura metálica (*stud frame*), geralmente galvanizada, fixada mediante ancoragens (Figura 2.11). Esta estrutura serve de ponte de ligação à estrutura do edifício e de suporte de elementos de revestimento. As ancoragens estão espaçadas regularmente, o que permite assegurar a distribuição dos efeitos da ação do vento. Podem ser ancoragens flexíveis, em forma de L, que funcionam como um suporte lateral e possibilitam rotações e translações devidas a efeitos de retração, temperatura ou humidade (Figura 2.12), e podem ser ancoragens de suporte, ou de gravidade, posicionadas na base do painel e que suportam o seu peso (Figura 2.13).



Figura 2.11 – Construção *stud-frame* fabricada a partir de secções retangulares ocas (GRCA International 2005)



Figura 2.12 – Ancoragens flexíveis (GRCA International 2005)

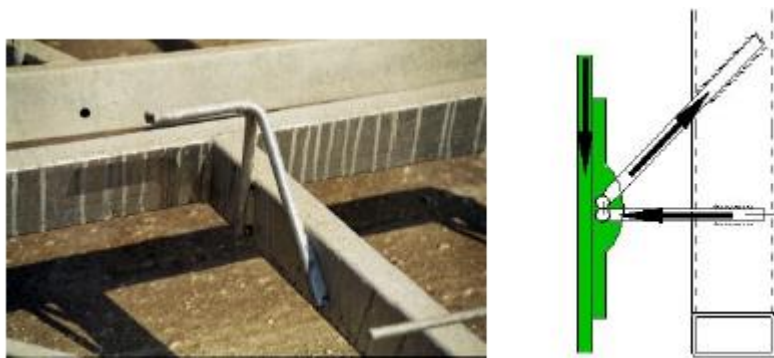


Figura 2.13 – Ancoragens de gravidade ou suporte (GRCA International 2005)

2.2.4. PAINEL “SANDWICH”

O painel *sandwich* é formado por duas lâminas de GRC, com um núcleo de poliestireno expandido, ou outro material leve. É um modelo utilizado para aplicações mais específicas, como por exemplo, placagem. As duas lâminas estão, geralmente, ligadas de forma contínua pelos bordos e apresentam, tipicamente, uma espessura de cerca de 10 a 15 mm. É uma técnica de construção de painéis bastante eficiente em termos de capacidade resistente e rigidez, em que o GRC é posicionado nas regiões de tensões máximas. Na Figura 2.14 é apresentado um modelo do painel *sandwich*.



Figura 2.14 - Painel sandwich (Tavares 2014)

2.3. TIPOS DE FIXAÇÃO

No estudo do comportamento de um painel, para além da influência do próprio material, é importante analisar a forma como o elemento está fixado à estrutura, isto é, conhecer o sistema de fixação. A principal função do sistema de fixação é assegurar que o elemento de GRC está convenientemente ligado à estrutura e que, ao mesmo tempo, os movimentos devidos às variações de temperatura e humidade não geram esforços. As fixações habitualmente utilizadas com o betão, pedra, fibrocimento, aço, entre outros, podem ser diretamente adaptadas para o GRC, dando uma vasta gama de possibilidades.

O dimensionamento das fixações deve ter em conta as constantes variações de dimensão que podem ocorrer durante a vida útil do GRC. Caso a fixação restrinja estes movimentos, pode dar origem a curvatura ou elevadas tensões no material.

Para além da função principal, os sistemas de fixação devem (GRCA International 2005),(Vetrotex 1998):

- Proporcionar um ajustamento adequado entre o elemento e a estrutura e garantir a estabilidade de painéis à fachada;
- Manter integridade de apoio e contenção em todas as condições de exposição, minimizando as concentrações locais de tensão no GRC;
- Permitir translações e rotações entre os painéis e entre o painel e a estrutura, mantendo a impermeabilização das articulações;
- Assegurar a transmissão das forças para uma área suficientemente grande de GRC;
- Utilizar as propriedades de resistência totais do GRC, proporcionando apoio na direção vertical e apoios laterais na base e no topo dos painéis.

Para garantir que a força transferida para a fixação é distribuída por uma vasta área do painel, a fixação pode ser encapsulada num bloco de GRC ou podem ser utilizadas anilhas de grande tamanho ou placas. Os sistemas de fixação devem, ainda, ter em conta o local e as tolerâncias de fabrico, movimentos térmicos e humidade do GRC, e o movimento da estrutura. Na Figura 2.15 é apresentado um tipo de fixação que pode ser utilizado para um modelo de painel nervurado ou *stud-frame*.

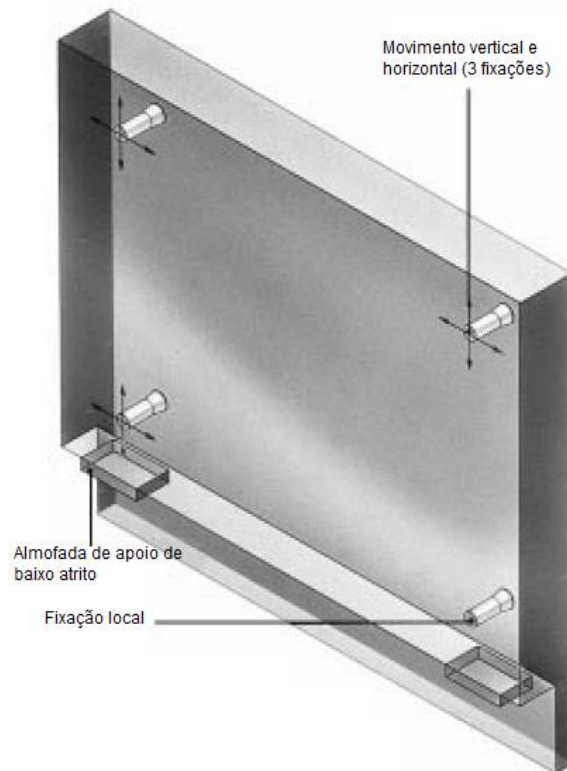


Figura 2.15 - Tipo de fixação utilizada para um painel nervurado ou para um painel do tipo *stud-frame*, (adaptado de (Vetrotex 1998))

De seguida, são apresentados os tipos de fixação mais comuns.

2.3.1. FIXAÇÕES ENCAPSULADAS

Este tipo de fixações encontram-se contidas num bloco de GRC de boa qualidade, pelo que consistem em tubos roscados internamente com ancoragem no encapsulamento final (Figura 2.16).

É um método de fixação bastante versátil, que permite uma vasta gama de suporte de placas ou grampos para serem aparafusadas ao painel e à estrutura. No entanto, o peso dos blocos de fixação podem aumentar significativamente o peso do painel, o que pode ser uma desvantagem.

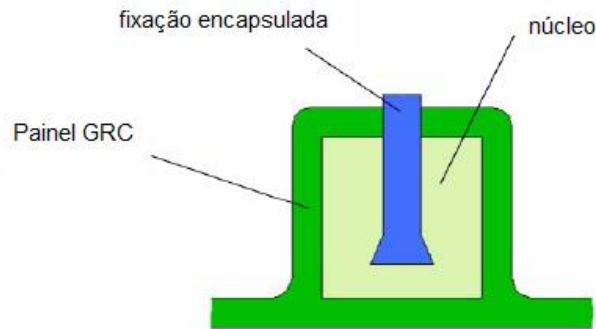


Figura 2.16 - Fixação encapsulada, adaptado de (GRCA International 2005)

O mecanismo de falha das fixações encapsuladas, ou com cavidade, é afetado pelas distâncias aos bordos, pela profundidade da cavidade, tipo de ancoragem e natureza da carga (tração pura/compressão ou combinação destas tensões com tensões de corte). É importante que exista uma boa distribuição das fibras no GRC próximo da cavidade (GRCA International 2005).

2.3.2. FIXAÇÕES LIGADAS COM ALMOFADA

Esta técnica consiste em fixações ligadas na face do painel em GRC por almofadas de ligação e também em GRC. O sistema mais comum deste género são as ancoragens flexíveis (Figura 2.17) e as ancoragens de gravidade utilizadas no modelo *stud frame*, mas pode também incluir consolas, placas dobradas ou ligações roscadas. A fixação é ligeiramente suspensa acima da face da lâmina recém projetada e fica ligada através de uma almofada de GRC. Esta almofada de ligação deve estar perto da dobra da ancoragem flexível de forma a não restringir o movimento do painel, e deve haver um intervalo mínimo de tempo entre a compactação final da lâmina de GRC, com rolo, e a aplicação da almofada de ligação, para garantir uma união monolítica entre esta e a lâmina.

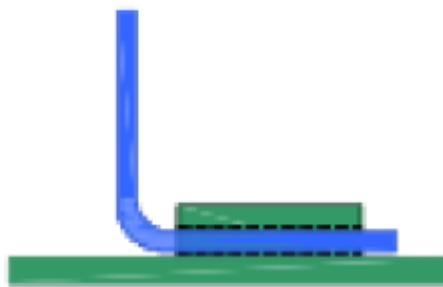


Figura 2.17 - Fixação com ancoragem flexível (GRCA International 2005)

2.3.3. FIXAÇÕES SECUNDÁRIAS

As fixações secundárias têm como principal função incorporar componentes no painel de GRC, como é o caso de janelas ou tubos de águas pluviais, por exemplo. Deve ser assegurado que a fixação secundária não restringe o movimento do painel em relação à fixação primária.

2.3.4. DIMENSIONAMENTO DAS FIXAÇÕES

De acordo com o Guia Prático de Conceção do GRCA Internacional (2005), no dimensionamento das fixações, devem ser primeiramente analisadas quaisquer restrições que possam existir no caso em consideração, uma vez que tais restrições podem ter uma grande influência na escolha e na conceção destas.

Depois, deve ser estudado o comportamento estrutural do painel sob efeito dos vários carregamentos. É conveniente evitar que os painéis sejam horizontais longos (com um rácio comprimento/profundidade > 4), uma vez que a flexão pode criar problemas na vizinhança da fixação, devido a movimentos de translação e rotação. Por sua vez, as fixações devem ser posicionadas de modo a minimizar as tensões induzidas nos painéis, distribuindo as forças convenientemente pelo painel de GRC.

Devem também ser consideradas tolerâncias ou folgas relativamente aos sistemas de fixação para permitir a liberdade de movimentos devido à retração e às variações térmicas, evitando que o GRC fendilhe com excessivas tensões localizadas, e também para atender a desvios geométricos (tolerâncias de construção). Como regra geral, deve ser procurado utilizar fixações em aço inox, sempre que possível, devido à sua resistência à corrosão (GRCA International 2005).

Uma vez que as fixações têm mecanismos de rotura de análise complexa, o dimensionamento e respetivos cálculos são, habitualmente, baseados em ensaios representativos do estado limite último de resistência.

3

COMPORTAMENTO MONOTÓNICO E CÍCLICO DO GRC

3.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a par da crescente utilização do betão reforçado com fibras, têm sido desenvolvidos vários trabalhos para caracterização estática e cíclica, isto é, o estudo do comportamento do material quando sujeito a carregamentos cíclicos repetidos. De facto, as estruturas estão frequentemente submetidas a um conjunto de ações cíclicas repetidas, como é o caso da solicitação do vento, de vibração de máquinas, de ondas marítimas ou até tráfego rodoviário. As propriedades do material sob condições de carregamento monotónico são apenas representativas do primeiro ciclo de carga. Comparando com esse carregamento, o comportamento tensão-extensão do material em cargas cíclicas pode ter diferente tensão de rotura e diferente limite de elasticidade (Heffernan 1997). Estas solicitações levam, por sua vez, a uma diminuição constante na rigidez da estrutura, o que pode, eventualmente, provocar a rotura.

3.2. COMPORTAMENTO MONOTÓNICO

As propriedades do GRC são estáveis em condições secas, contudo a maioria das composições tende a perder uma proporção de resistência quando este é exposto a longos períodos húmidos. Propriedades como a resistência à flexão e à tração e tensão de rotura declinam para níveis estáveis (GRCA International 2005).

3.2.1. DIAGRAMAS TENSÃO-EXTENSÃO EM COMPRESSÃO, TRAÇÃO E FLEXÃO

A curva tensão-extensão do GRC, quando ensaiado à compressão, apresenta um comportamento linear até serem atingidas tensões elevadas e é semelhante à curva que representaria um ensaio de uma matriz sem adição de fibras. A Figura 3.1 mostra o comportamento típico do GRC à compressão. A sua resistência é bastante superior à resistência à tração (Vetrotex 1998).

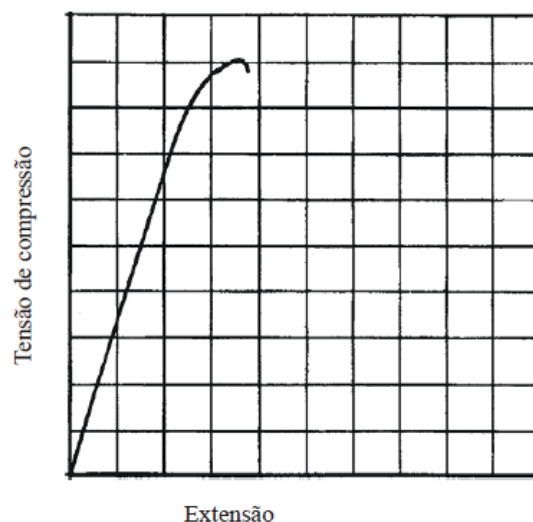


Figura 3.1 - Curva tensão-extensão do GRC em compressão (adaptado de (Vetrotex 1998))

Nos ensaios de tração, os diagramas obtidos podem ser de dois tipos: curva A apresentada na Figura 3.2 e a curva B na Figura 3.3. A curva A representa um provete de GRC *spray-up* jovem e a curva B um GRC *premix* ou *spray-up* envelhecido (Ferreira 2001).

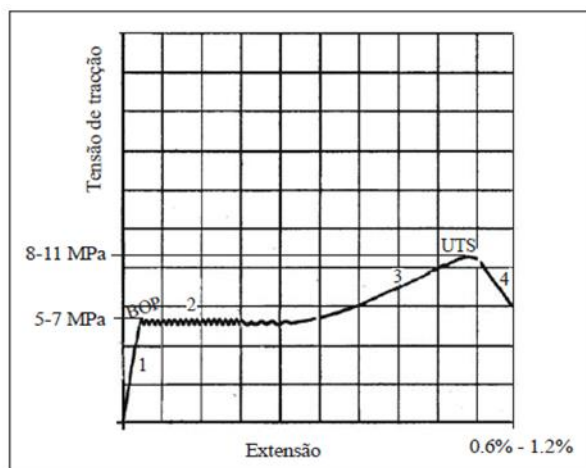


Figura 3.2 – Curva tensão – extensão do GRC em tração, do tipo A (adaptado de (Vetrotex 1998))

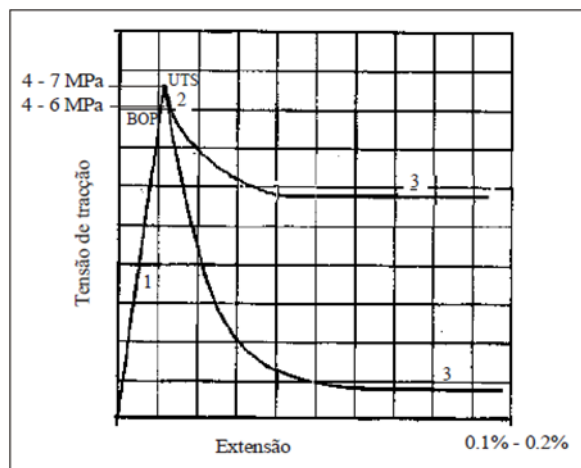


Figura 3.3 – Curva tensão – extensão do GRC em tração, do tipo B (adaptado de (Vetrotex 1998))

A zona 1, de ambos os diagramas, é um troço linear dependente das propriedades das fibras e da matriz. Uma vez que a secção transversal da matriz é bastante superior à das fibras, as propriedades do GRC, especialmente a sua rigidez, são muito próximas das representadas pela matriz isoladamente. Quando é atingido um valor próximo da tensão de rotura da argamassa, as fissuras propagam-se à volta das fibras de vidro e, a partir daí, o comportamento do compósito é determinado pela capacidade das fibras. Na curva A, é representado um carregamento que pode ser suportado pelas fibras. Estas atuam como agentes de reforço, à medida que a transferência da carga da fibra para a matriz vai ocorrendo por tensões de corte. O termo “BOP”, do inglês *bend-over-point*, corresponde ao ponto de transição entre a fase linear e a fase seguinte.

Na fase 2, começa a aparecer uma malha muito fina de fendas, difíceis de detetar visualmente. A abertura das fendas progride mais acentuadamente ao longo da fase 3, em que a quantidade de energia absorvida é bastante elevada. A tensão de tração máxima, UTS (*ultimate tensile strength*), é atingida na fase 4, de forma gradual, quando as fibras que atravessam uma fenda atingem a rotura. As curvas do tipo A são, geralmente, caracterizadas pela presença de fendilhação múltipla.

Na curva B, as fibras não têm capacidade para suportar o carregamento e a UTS é atingida, por sua vez, ligeiramente acima do ponto de transição BOP. Na fase 2 a carga começa a diminuir e até alcançar a fase 3, dependente da capacidade das fibras. Depois desta fase, é atingida a rotura das fibras. Esta curva apresenta, normalmente, os efeitos de uma fenda única onde se dá a rotura (Ferreira 2001).

Os ensaios de tração são caracterizados por necessitarem de uma determinação delicada, de equipamento caro, de um grande rigor na sua realização e por serem ensaios mais demorados. Uma vez que o ensaio de flexão é mais simples e prático, é usualmente empregue este ensaio em vez do ensaio à tração. No ensaio de flexão de um provete de secção retangular, verifica-se a ocorrência de tensões de compressão na face superior e tensões de tração na face inferior. A relação tensão-extensão é linear até se atingir o BOP na zona tracionada. Após esta transição, a distribuição de tensões na zona de tração deixa de ser linear e o eixo neutro desloca-se para a zona superior, isto é, para a zona comprimida.

A Figura 3.4 compara a resposta de provetes de GRC em ensaios de flexão, tração e compressão.

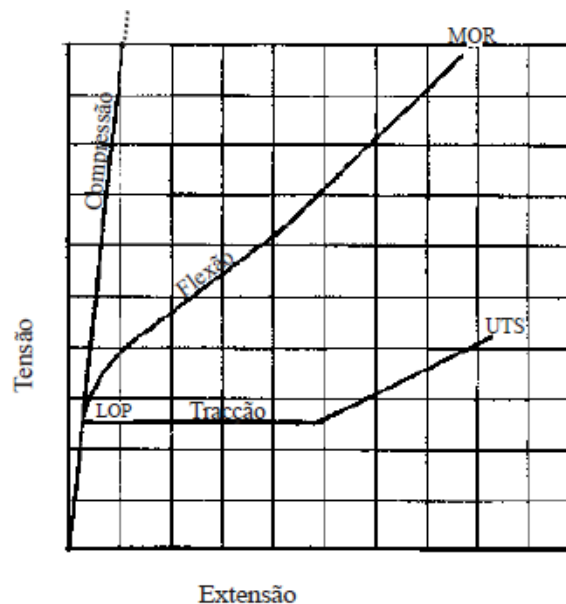


Figura 3.4 – Curva de compressão, tração e flexão do GRC (adaptado de (Vetrotex 1998))

O parâmetro MOR (*modulus of rupture*) representa o ponto correspondente à rotura em ensaios de flexão em provetes, ao passo que o parâmetro LOP (*limit of proportionality*) representa o ponto correspondente ao limite de proporcionalidade em ensaios de flexão em provetes. Este último tende a aumentar ligeiramente com o tempo devido à contínua hidratação do cimento.

Da análise das três curvas, poderia ser considerado que o valor do LOP coincidia com o valor do BOP. Deste modo, o valor de BOP poderia ser assumido como a tensão LOP do ensaio de tração. Contudo, pesquisas e ensaios experimentais concluem que a tensão LOP do ensaio de tração (BOP) é inferior à tensão LOP no ensaio de flexão. Esta diferença pode ser justificada tendo em conta que, no que toca a

materiais frágeis, os valores obtidos para carregamentos em flexão são, habitualmente, superiores aos obtidos em condições de tração pura. A diferença entre o comportamento à flexão e à tração pode ainda ser relacionada com a diferença entre o parâmetro de tensão MOR e pelo parâmetro UTS. Neste caso, o MOR pode apresentar valores cerca de 2,5 vezes superiores aos valores para o UTS (Vetrotex 1998).

3.2.2. ENVELHECIMENTO DO GRC

Uma das questões fundamentais a analisar no GRC é a durabilidade, uma vez que se trata de um material sensível ao envelhecimento, principalmente em ambientes húmidos. O envelhecimento do GRC está relacionado com mecanismos que diminuem a resistência à tração e ao choque do material: ataque químico sofrido pelas fibras de vidro, deposição de produtos de hidratação do cimento nos interstícios entre a matriz e as fibras e fadiga estática (Tavares 2014).

Em relação ao primeiro mecanismo, este ocorre quando as fibras se encontram expostas ao meio alcalino da pasta de cimento, principalmente a temperaturas e humidades elevadas. Quando expostas a estas condições, as fibras sofrem uma deterioração acentuada num curto espaço de tempo, diminuindo o seu diâmetro e peso, resultando numa redução da resistência à tração e à flexão do compósito. Nas primeiras aplicações do GRC eram utilizadas fibras de vidro do tipo E, no entanto, a sua sensibilidade ao meio alcalino condicionou o seu uso. Atualmente este problema tem vindo a ser ultrapassado com o aparecimento de novos tipos de fibras de vidro alcalino-resistentes e com a incorporação de aditivos que atuam na argamassa de cimento para reduzir a sua alcalinidade ou que protegem a superfície das fibras do ataque alcalino.

As primeiras fibras de vidro alcalino-resistentes foram desenvolvidas pelo *Building Research Establishment* (BRE), em Inglaterra, tendo sido estudada a melhor forma de as integrar nas matrizes de cimento. Estas fibras, designadas por “AR” (do inglês *Alkali Resistant*), têm cerca de 16 % de zircónia (ZrO_2) que as protege do meio alcalino, permitindo a diminuição significativa do ritmo de deterioração do GRC.

A deposição de produtos de degradação de produtos de hidratação do cimento nos interstícios entre a matriz e as fibras provoca a densificação da matriz em torno das fibras. Tal facto leva a um considerável aumento da aderência entre a matriz e os filamentos que, por sua vez, induz a que o material tenha um comportamento frágil em vez de dúctil, já que o modo de rotura passa a ser pela rotura das próprias fibras e não pelo arrancamento destas. Desta forma, é reduzida a resistência ao choque do compósito. Por outro lado, a densificação da matriz em torno das fibras provoca o incremento de tensões devidas à flexão localizada que ocorre quando as fibras atravessam uma fenda com forma oblíqua.

Por fim, o terceiro mecanismo de degradação, a fadiga estática, que se traduz na perda de resistência ou cedência do material sem que sejam aplicadas quaisquer cargas cíclicas. É um fenómeno de rotura tardia dos vidros caracterizado pela ocorrência de falhas espontâneas a níveis de tensão inferiores à respetiva tensão de rotura (Tavares 2014).

De maneira a retardar o máximo possível o envelhecimento do GRC, têm sido implementadas algumas soluções, como a já referida incorporação de fibras de vidro alcalino-resistentes. Outra das soluções possíveis é modificar a matriz cimentícia de modo a diminuir ou evitar os efeitos que decorrem dos mecanismos mencionados anteriormente. Uma das modificações é substituir parcialmente o cimento Portland por materiais finos (pozolanas ou cinzas volantes), diminuindo a alcalinidade da matriz. Outra das alternativas é substituir o cimento Portland por outro, como o cimento aluminoso, por exemplo. Por fim, podem ser adicionados materiais poliméricos à matriz, como o polímero acrílico (polímero Forton), entre outros. Estes polímeros, ao serem integrados na pasta de cimento, ocupam espaços intersticiais

entre a matriz e as fibras, formando películas plásticas à volta destas e que, por conseguinte, protegem a superfície das fibras do ataque químico e da deposição dos produtos de hidratação do cimento.

3.2.3. ENVELHECIMENTO DOS PAINÉIS DE FACHADA EM GRC

Para apresentar o comportamento típico do GRC, em termos de envelhecimento, mostram-se alguns dos resultados obtidos no estudo de Tavares (2014), que incidiu sobre painéis semelhantes aos considerados na presente dissertação.

Neste estudo foram realizados ensaios de flexão baseados na norma NP EN 1170-05, com provetes de diferentes idades, tendo a maioria sido submetida ao envelhecimento acelerado através da imersão em água a elevadas temperaturas.

A partir dos ensaios realizados, foram determinadas as tensões σ_{MOR} , isto é, a tensão resistente na rotura e σ_{LOP} , a tensão limite de proporcionalidade, e as correspondentes extensões, respetivamente: ϵ_{MOR} e ϵ_{LOP} . Tendo em conta o que já foi referido anteriormente sobre os parâmetros LOP e MOR (figura), o LOP tem tendência a aumentar ligeiramente com o tempo, ao contrário do MOR, que tende a diminuir. Na Figura 3.5 é apresentado um diagrama com a variação do parâmetro MOR, em função do tempo, tendo em conta o efeito de envelhecimento do GRC.

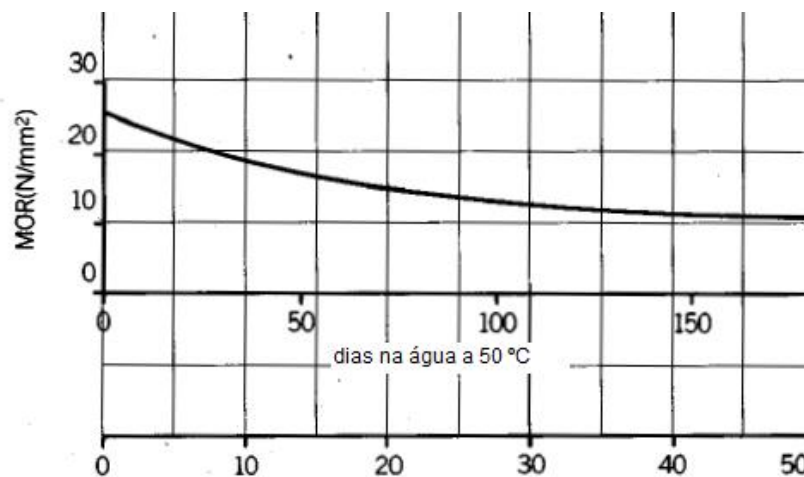


Figura 3.5 – Evolução do parâmetro MOR, tendo em conta o envelhecimento do GRC (adaptado de (Vetrotex 1998))

O gráfico da Figura 3.6 apresenta a evolução da tensão resistente em função da idade.

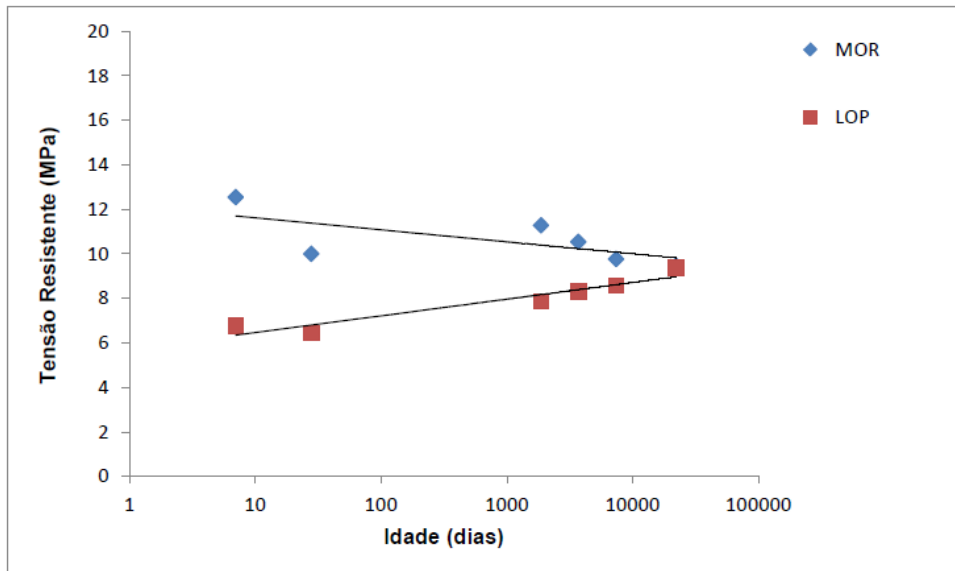


Figura 3.6 – Evolução dos parâmetros LOP e MOR (Tavares 2014)

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 3.6, os dois parâmetros evoluem conforme o esperado teoricamente. O valor do MOR nos provetes envelhecidos tende a decrescer, ao passo que o valor do LOP tende a aumentar.

Na Figura 3.7 são mostrados diagramas tensão-extensão, tendo em conta o envelhecimento, de três provetes ensaiados. Como é possível observar, o envelhecimento tem um efeito notório sobre a diminuição da resistência do GRC.

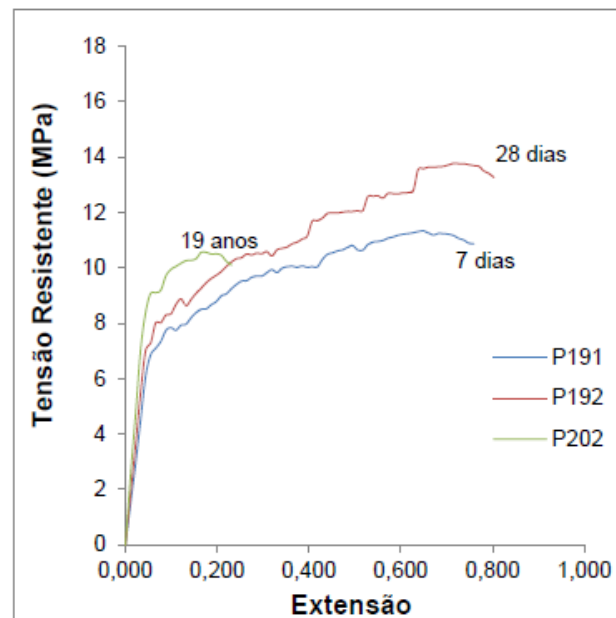


Figura 3.7 – Diagramas tensão/extensão (Tavares 2014)

3.3. COMPORTAMENTO CÍCLICO E FADIGA

Segundo a A.S.T.M. (*American Society for Testing and Materials*) o fenómeno de fadiga pode ser definido como um “processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre

num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou vários pontos e que pode culminar em fendas ou numa fratura completa após o número suficiente de variações de carga” (Branco 1985). Sendo assim, o processo de fadiga desenvolve-se durante um determinado período de tempo e em algumas áreas locais de um elemento.

No caso do betão, as alterações decorrentes da fadiga estão normalmente associadas a um crescimento progressivo de microfendas, que resultam num aumento significativo de tensão irrecuperável (Lee e Barr 2004).

O carregamento à fadiga é, geralmente, dividido em três categorias: número reduzido de ciclos, número médio de ciclos e número elevado de ciclos. Na Figura 3.8 é mostrada uma tabela com a caracterização dos três tipos de carregamento. Os carregamentos de baixo número de ciclos (1 a 10^2) envolvem a aplicação de um número reduzido de repetições, geralmente com uma grande amplitude, como é o caso da ação sísmica, por exemplo. Os carregamentos de alto número de ciclo (10^3 a 10^6) estão associados a um número elevado de repetições, com uma amplitude inferior, como é o caso do tráfego rodoviário e ferroviário, vento, entre outros. No caso de estruturas marítimas ou de transportes como o metro, por exemplo, são associados os carregamentos com o número de repetições mais elevado (10^7 a 10^9).

Baixo número de ciclos			Alto número de ciclos				"Super"-alto número de ciclos		
1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Estruturas sujeitas a atividade sísmica			Aeroportos, Pavimentos e Pontes		Pontes rodoviárias e ferroviárias, pavimentos rodoviários		Transportes urbanos rápidos		Estruturas marítimas

Figura 3.8 - Tipos de carregamento à fadiga (adaptado de (Seitl et al. 2009))

Uma rotura por fadiga ocorre sem aviso prévio, a menos que existam inspeções que controlem a abertura de fendas. Da mesma forma que ocorre nos metais, o processo que leva à rotura de fadiga do betão por macrofissuras sucede-se consoante três fases: começa por uma zona de iniciação de fenda, que ocorre tipicamente nos pontos de maiores tensões e/ou menor resistência. A segunda fase é caracterizada pelo crescimento estável da fenda, isto é, pela propagação da fenda e, por fim, a terceira fase está associada à fratura final (normalmente frágil), com o crescimento instável da macrofissura (Hanson 1974), (Branco 1985). No que diz respeito à durabilidade da estrutura, a fase mais importante é a segunda pois representa até 80 % do ciclo total de vida. Deste modo, a quantificação do desenvolvimento da fenda nesta fase é de considerável importância (Seitl et al. 2009).

A tensão máxima aplicada, a amplitude de tensão aplicada e o número de ciclos são algumas das variáveis que influenciam a resistência à fadiga. Assim como no caso dos ensaios estáticos ou monotónicos, têm sido utilizadas diferentes combinações de carregamentos para os ensaios de fadiga, incluindo ensaios à compressão, tração e flexão (Lee e Barr 2004).

A resistência à fadiga do betão é definida como uma fração da resistência estática que este pode suportar repetidamente para um determinado número de ciclos. O betão, quando sujeito a carregamentos repetidos, pode exibir excessivas fissuras e pode, eventualmente, entrar em rotura após um número suficientemente elevado de repetições, mesmo que a carga máxima seja menor do que a sua resistência estática. A resistência à fadiga do betão para cerca de dez milhões de ciclos, em compressão, tração ou flexão, é aproximadamente de 55 % da sua resistência estática (Hanson 1974).

Ao contrário do que acontece com os metais, o betão não aparenta ter um limite de fadiga. Segundo Lee e Barr (2004), o betão submetido a repetidos carregamentos de tensão uniaxial não apresenta um limite de fadiga antes dos $2 \cdot 10^6$ ciclos. A resistência à fadiga e o limite de fadiga são quantidades estatísticas dos ensaios de fadiga caracterizados por uma dispersão de resultados em função das dimensões dos provetes, níveis de precisão, heterogeneidade do material, entre outros.

A crescente utilização de betão reforçado com fibras (FRC – “*fibre reinforced concrete*”) tem promovido a necessidade de estudar o seu comportamento sob condições de fadiga. De um modo geral, tem sido observado que a adição de fibras ao betão pode melhorar significativamente o seu desempenho à fadiga, por flexão. A extensão desta melhoria é dependente de diversos fatores, como a quantidade de fibras, o seu tipo, geometria, por exemplo. No FRC, a ação das fibras dissipa a energia na sequência da abertura da fissura, inibindo o seu crescimento e, assim, aumenta a capacidade de carregamento do material. Tal como acontece para o carregamento estático, a ação das fibras é mais notória no desenvolvimento de um grande número de pequenas fissuras do que num pequeno número de grandes fissuras. Para além deste aspeto, a inclusão de fibras provoca um comportamento mais dúctil durante o carregamento de fadiga (Lee e Barr 2004).

Os efeitos da variação de tensão são, normalmente, apresentados com recurso à curva S-N (*Stress-Number of cycles*), ou também conhecida por “curva de Wöhler”, que relaciona o nível de tensão (S) em função do número de ciclos da aplicação de carga até à rotura (N), em escala logarítmica, para uma tensão mínima constante.

Nas figuras seguintes, são apresentados os resultados de ensaios de fadiga, sob compressão (Figura 3.9) e sob flexão (Figura 3.10), respetivamente. A curva S-N diz respeito a três materiais, sendo que um deles é de betão “simples” e os outros dois FRC, mas com diferentes quantidades de fibras adicionadas (0,5 % e 1 %), neste caso, de aço.

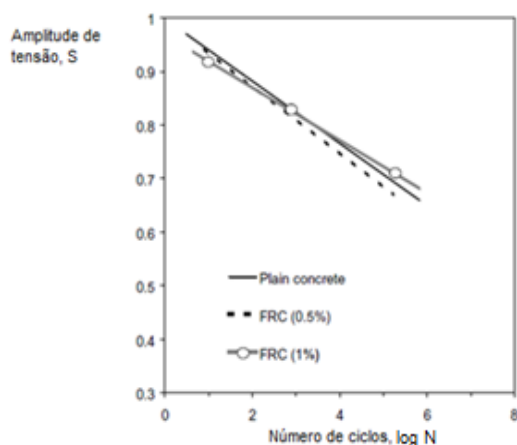


Figura 3.9 – Curva S-N do GRC à compressão (adaptado de (Lee e Barr 2004))

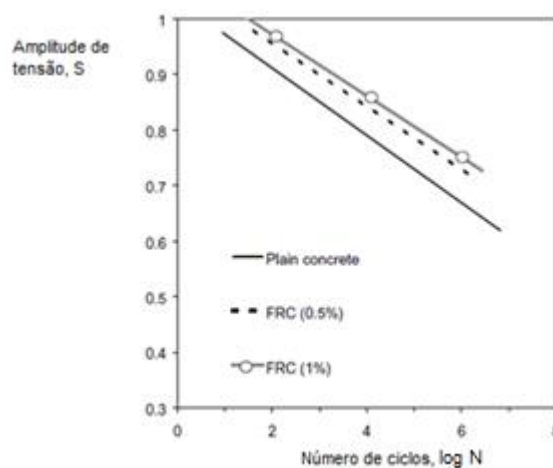


Figura 3.10 – Curva S-N do GRC à flexão (adaptado de (Lee e Barr 2004))

Tendo em conta a análise das curvas, não parece existir um melhoramento da resistência à fadiga do betão reforçado com fibras, relativamente ao betão simples, à compressão. Pelo contrário, no carregamento à flexão, parece existir uma melhoria considerável do desempenho do betão com fibras.

A melhoria é ligeiramente significativa comparando o betão simples com o FRC com 0,5 % de conteúdo em fibras e maior ainda relativamente ao FRC com 1 %. Através da análise dos resultados, é possível referir que a adição de fibras é mais eficaz em condições de flexão, no que toca ao comportamento à fadiga. É também observado que não existe um limite de fadiga antes dos 10^6 ciclos.

Atualmente, a maioria das investigações aponta para uma melhoria do desempenho à fadiga resultante da adição de fibras ao betão. No entanto, trata-se de uma questão complexa, uma vez que envolve um conjunto de fatores do material e do próprio ensaio que condicionam este desempenho. Por outro lado, até à data não existe ainda uma norma específica para os ensaios de fadiga no FRC. Por conseguinte, os dados obtidos a partir de um determinado ensaio não podem ser diretamente comparados com os dados obtidos através de outro ensaio com diferentes carregamentos.

Os resultados dos ensaios de fadiga em amostras nominalmente idênticas de qualquer material, mostram uma grande dispersão. Num material como o GRC, a resistência última tem um coeficiente de variação típico de 10%, e deve ser testado um número significativo de amostras para cada nível de tensão (Hibbert e Grimer 1975).

De seguida, são analisados os resultados de um estudo realizado por Seidl (2013), sobre a fadiga e parâmetros de rotura do GRC. Foram ensaiados três provetes de um betão com uma combinação de polipropileno e polietileno (BS 080405), e um provete com fibras de vidro alcalino-resistentes (HD 080326 - teor de 0,2 %). Através do ensaio de flexão em três pontos, as amostras foram ensaiadas estaticamente, numa primeira fase, e depois ciclicamente para estudar o desenvolvimento da fissura sob carregamento cíclico. A Tabela 3.1 e a Figura 3.11 demonstram as propriedades dos materiais utilizados e resultados, respetivamente.

Tabela 3.1 – Propriedades das amostras ensaiadas (Seidl et al. 2013)

<i>Component [Unit]</i>	<i>BS 080405</i>	<i>HD 080326</i>
CEM I 42.5 R Mokra [kg/m ³]	850	1000
Sand, 0/4 mm [kg/m ³]	1350	940
Water [kg/m ³]	197	280
Stachement 2060 superplasticizer [kg/m ³]	12	15
Polymer fibers BS 55 mm [kg/m ³]	2.5	–
Glass fibers HD 12 mm [kg/m ³]	–	6

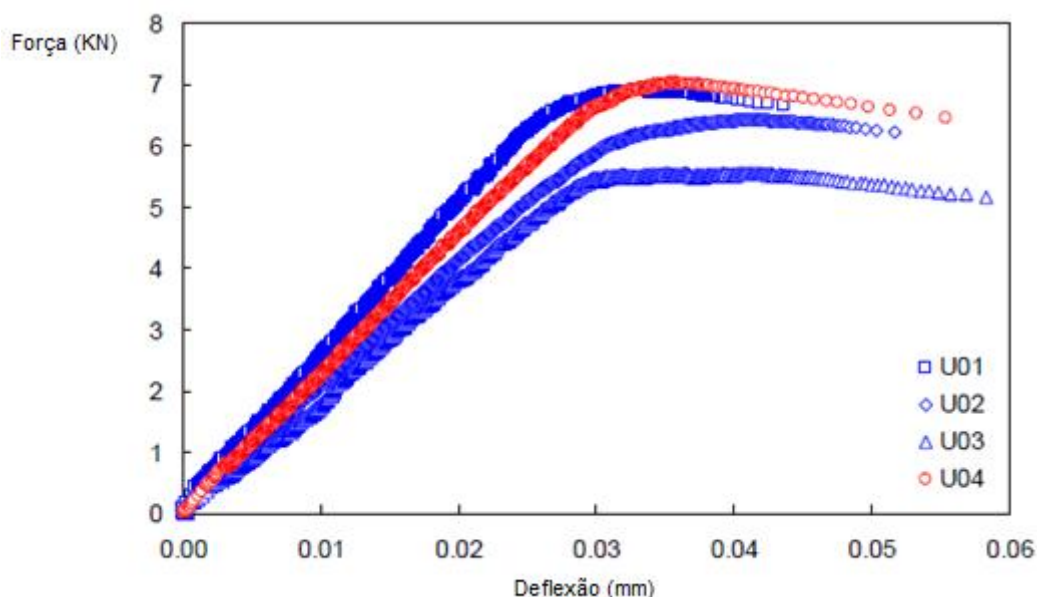


Figura 3.11 – Diagrama carga-deflexão das amostras sob ensaio monotónico (adaptado de (Seitl et al. 2013))

Os ensaios de fadiga foram conduzidos através de um atuador servo-hidráulico e sob carregamento controlado. A frequência utilizada foi de cerca de 10 Hz e a partir dos resultados foram determinadas as expressões analíticas para traçar as curvas por regressão linear. Nesta segunda fase, o rácio de propagação da fenda foi determinado num ensaio de flexão em três pontos da amostra e correlacionado com a gama do fator de intensidade de tensão aplicada, correspondendo à Lei de Paris. Para completar parâmetros básicos da fadiga, foi determinada a curva S-N ou curva de Wöhler. A equação da curva (3.1) é apresentada a seguir (Seitl et al. 2013):

$$S_n = a \times \log N + b \quad (3.1)$$

Onde a e b são parâmetros do material, S é o nível de tensão e N o número de ciclos.

Os resultados do ensaio de fadiga são sumarizados nas figuras seguintes. Na primeira, é mostrada a máxima variação da tensão em flexão (σ_f) em função do logaritmo do número de ciclos até à rotura por fadiga (N) (Figura 3.12). O segundo representa as curvas S-N, obtidas dividindo os valores dos primeiros diagramas pela correspondente resistência média à flexão estática para o mesmo conjunto de amostras (Figura 3.13). Neste diagrama foram também adicionados outros dados retirados da bibliografia, nomeadamente dos que já foram apresentados anteriormente neste trabalho, por Lee e Barr, sobre o FRC (com fibras de aço).

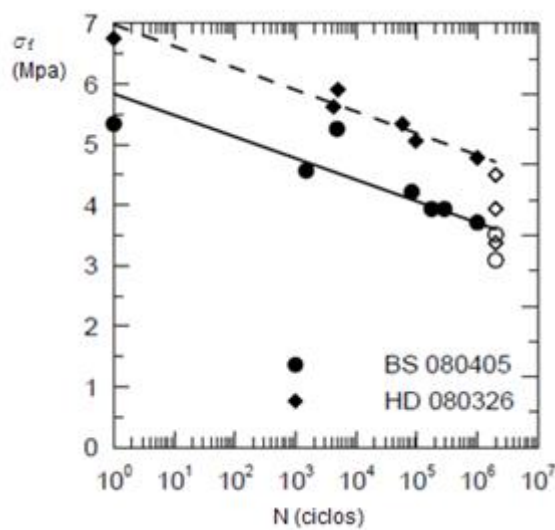


Figura 3.12 - Diagrama tensão/número de ciclos em escala logarítmica (adaptado de (Seitl et al. 2013))

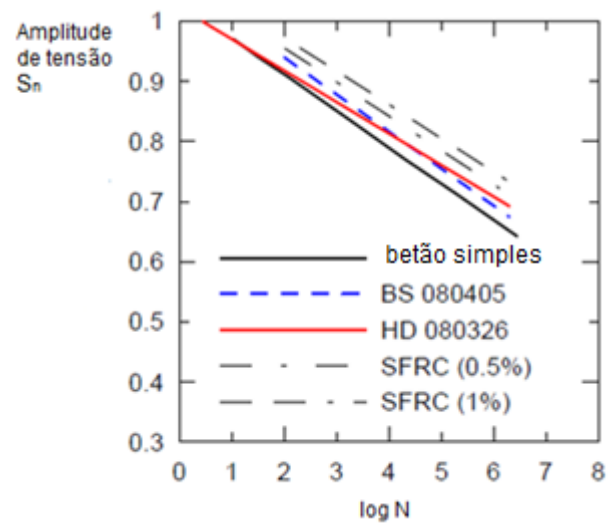


Figura 3.13 – Curvas S-N das cinco amostras (adaptado de (Seitl et al. 2013))

A partir do primeiro diagrama pode ser observado que, para valores mais reduzidos de N , as curvas σ_f - N tendem a convergir para valores de σ_f que são maiores do que o valor estático ($N = 1$). Tal facto deve-se, essencialmente, à tensão de compressão utilizada como referência que foi obtida a partir de ensaios monotónicos, cuja carga é mais baixa do que a dos ensaios cíclicos.

Relativamente ao segundo diagrama, pode observar-se que a adição de fibras tem um efeito significativo no que diz respeito ao comportamento à fadiga do betão. A melhoria é considerável com um teor em fibras de 0,2 % e depois de 0,5 a 1 %.

Pode então ser concluído que a utilização do betão HD 080326, com fibras de vidro, é preferível à utilização do betão com fibras poliméricas (Seitl et al. 2013).

Na Figura 3.14 é apresentado o diagrama tensão máxima à flexão – número de ciclos de uma amostra de GRC (Vetrotex 1998).

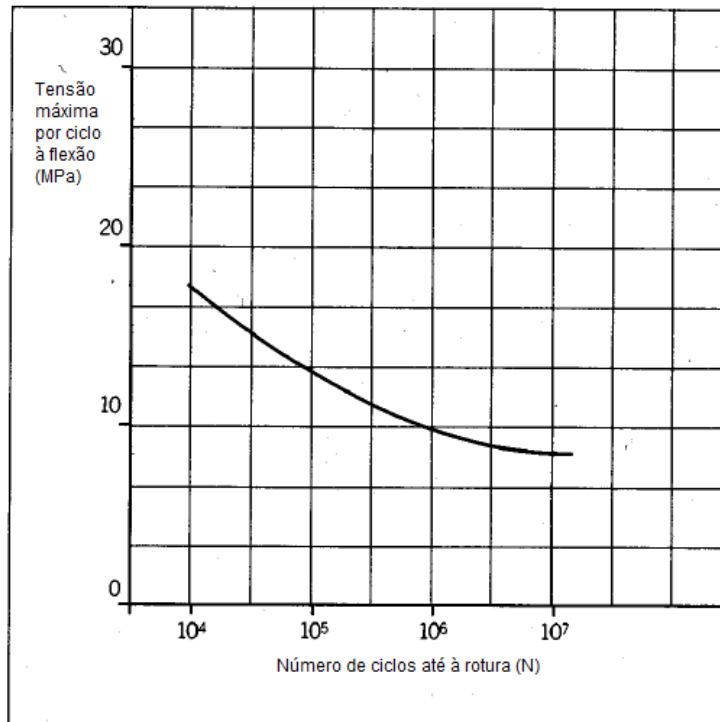


Figura 3.14 – Comportamento cíclico de uma amostra de GRC (adaptado de (Vetrotex 1998))

Ferreira, J. (2001) realizou ensaios para avaliar o comportamento cíclico em tração e em compressão do GRC e, com base nos dados obtidos, desenvolveu um modelo numérico para a sua simulação. Primeiramente, foram aplicadas extensões positivas aos provetes de GRC, cujos deslocamentos correspondentes foram aplicados de forma gradualmente ascendente. Para cada valor de extensão foram aplicados ciclos de carga e descarga. Apresenta-se, seguidamente, os resultados para o ensaio cíclico com extensões positivas e principais conclusões. Na Figura 3.15 são mostrados os resultados num diagrama tensão/extensão. Na Figura 3.16 é apresentada a variação de rigidez em função das extensões.

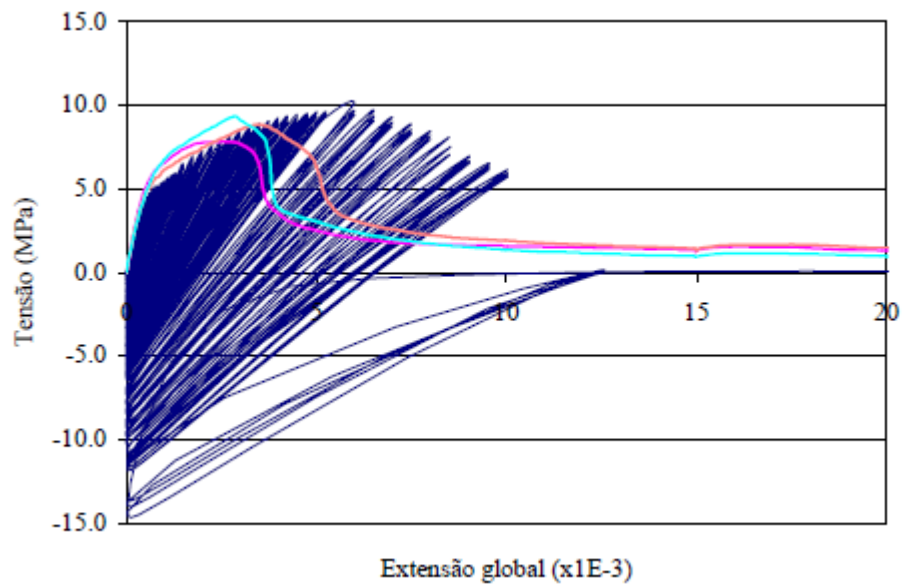


Figura 3.15 - Resultados do ensaio cíclico com extensões positivas tensão/extensão (Ferreira 2001)

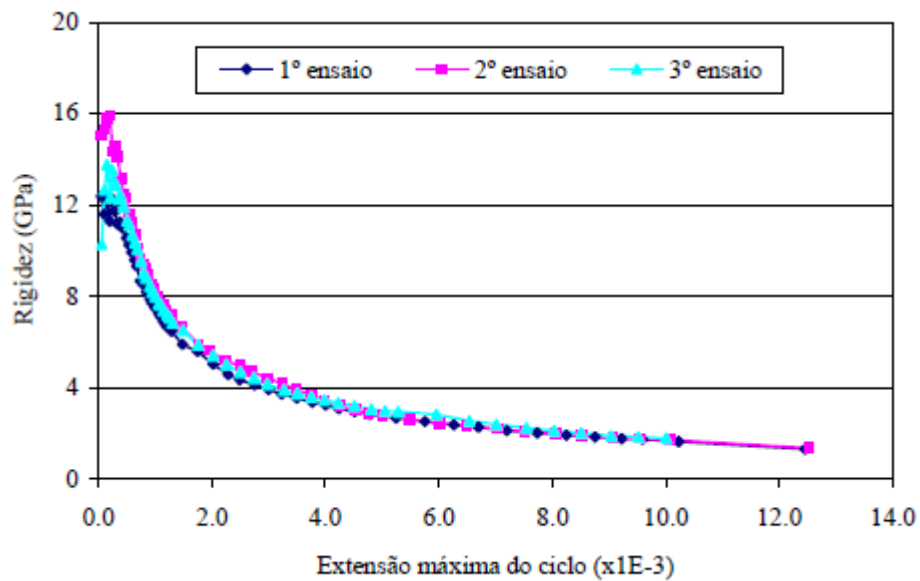


Figura 3.16 - Variação da rigidez durante os ensaios cíclicos com extensões positivas (Ferreira 2001)

À medida que as extensões aumentam, existe uma perda gradual de rigidez, à exceção dos ciclos iniciais com mais instabilidade. É também verificado que se geram decréscimos bastante significativos de tensões para extensões superiores a 1500×10^3 .

Os diagramas cíclicos apresentam uma envolvente, isto é, são delimitados pelas linhas que definem o comportamento monotónico do GRC à tração.

Verifica-se a ocorrência de extensões residuais positivas para carga nula, o que implica que se geram tensões de compressão para repor a extensão nula em cada ciclo (Ferreira 2001).

Os ensaios de compressão cíclica (Figura 3.17), realizados posteriormente, evidenciaram o comportamento dúctil dos provetes e, tal como para os ensaios de tração, mostraram a envolvente do diagrama definida pelos ensaios monotónicos.

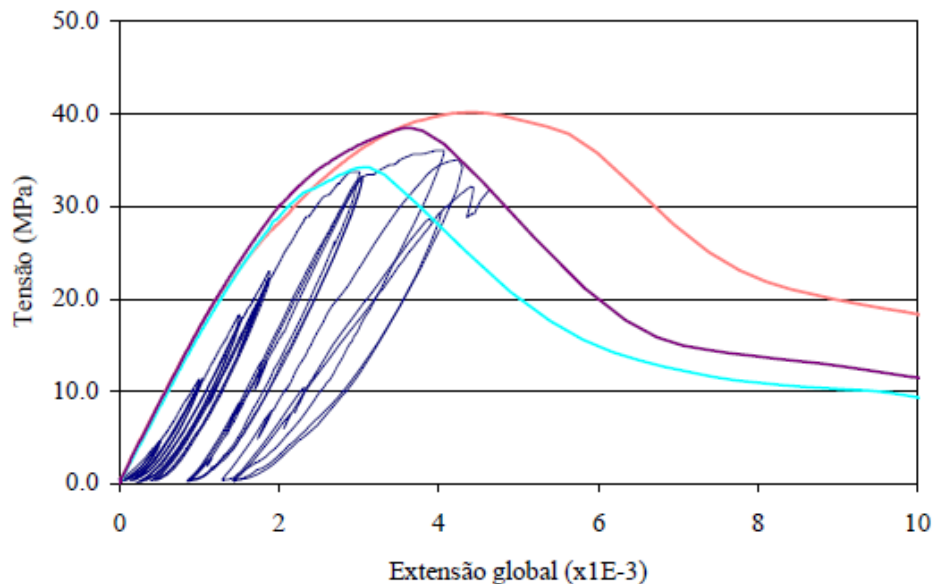


Figura 3.17 - Ensaio de compressão cíclica de um provete cilíndrico. Extensão global (Ferreira 2001)

Os valores da tensão máxima atingida são da mesma ordem de grandeza dos verificados nos ensaios monotónicos. Deste modo, não há perda significativa de resistência devido ao comportamento cíclico.

As extensões máximas verificadas nos ensaios cíclicos são inferiores às atingidas nos ensaios monotónicos. Tal facto deve-se à degradação das propriedades do GRC derivadas das repetições dos ensaios cíclicos (Ferreira 2001).

De acordo com a GRCA International (2005), o GRC não sofre de fenómenos de fadiga resultante das ações cíclicas (vento neste caso), desde que as tensões nas fibras sejam inferiores ao LOP. Como tal, esta situação tem que ficar garantida para o dimensionamento dos painéis. O processo de fadiga encontra-se essencialmente relacionado com o aparecimento e consequente propagação de fendas. Sendo assim, uma das formas para evitar a rotura por fadiga é evitar a abertura de fendas e a outra é permitir o crescimento controlado das fissuras (Branco 1985).

4 **CASO DE ESTUDO**

4.1. INTRODUÇÃO

Algumas das ações mais importantes para considerar no dimensionamento de estruturas tem caráter cíclico, como por exemplo, a ação do vento ou a ação sísmica. Por esse motivo, o estudo do comportamento cíclico representa um aspeto fundamental para painéis de fachada que se encontram sujeitos a ações dinâmicas importantes e com uma grande distância entre apoios, como acontece no caso em estudo na presente dissertação. Conhecer a capacidade resistente tendo em conta o comportamento monotónico e a influência das fixações, é outro dos aspetos essenciais.

Neste capítulo descreve-se, sucintamente, o elemento construtivo em estudo (painel de fachada), a sua constituição, o seu processo de fabrico e a sua função no edifício. Depois, apresentam-se os provetes ensaiados no âmbito desta dissertação.

4.2. PAINEL

Neste trabalho é desenvolvido o estudo de um painel em GRC, fabricado pela MEBEP, para aplicação na fachada de um edifício real. Nesta fachada, o painel vai ser introduzido como uma lâmina ou perfil vertical, conforme é representado nas figuras seguintes. A Figura 4.1 apresenta o modelo do painel em estudo e a Figura 4.2 a sua secção transversal e a configuração que o painel apresenta na fachada do edifício. O revestimento da fachada é ritmadamente interrompido pelos painéis verticais de diferentes espessuras e alturas, ao longo dos pisos.

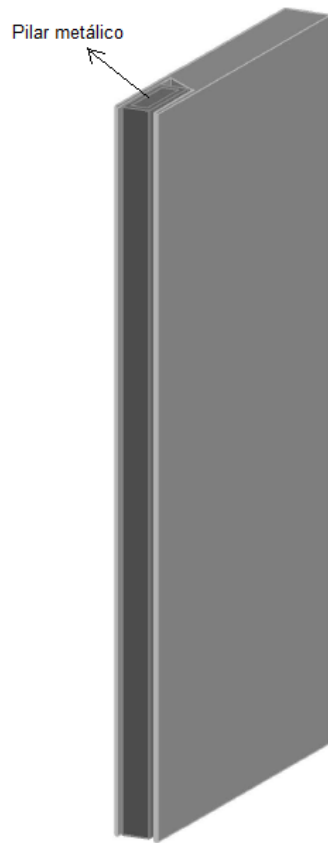


Figura 4.1 - Modelo do painel em 3D

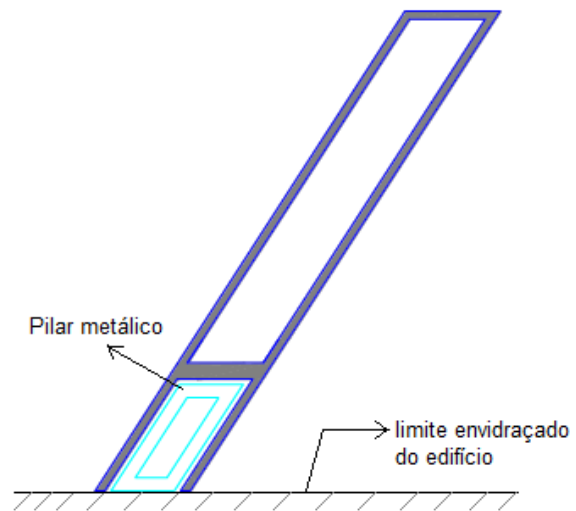


Figura 4.2 - Secção transversal do painel (corte horizontal da lâmina em GRC)

A Figura 4.3 apresenta as dimensões da secção transversal do painel em estudo. Na mesma figura, está também representada a estrutura metálica que atravessa o painel. O corte da secção transversal da Figura 4.3 é apresentado na Figura 4.4.

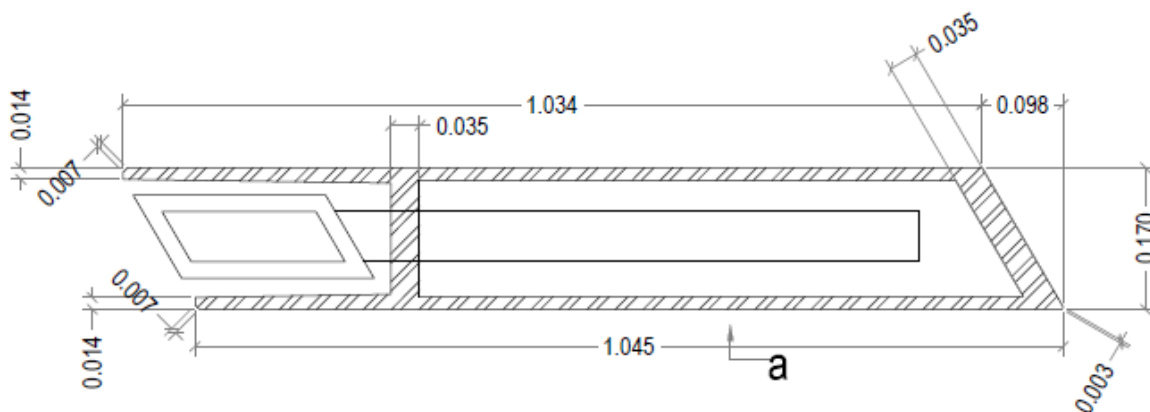


Figura 4.3 – Secção transversal do painel e estrutura metálica

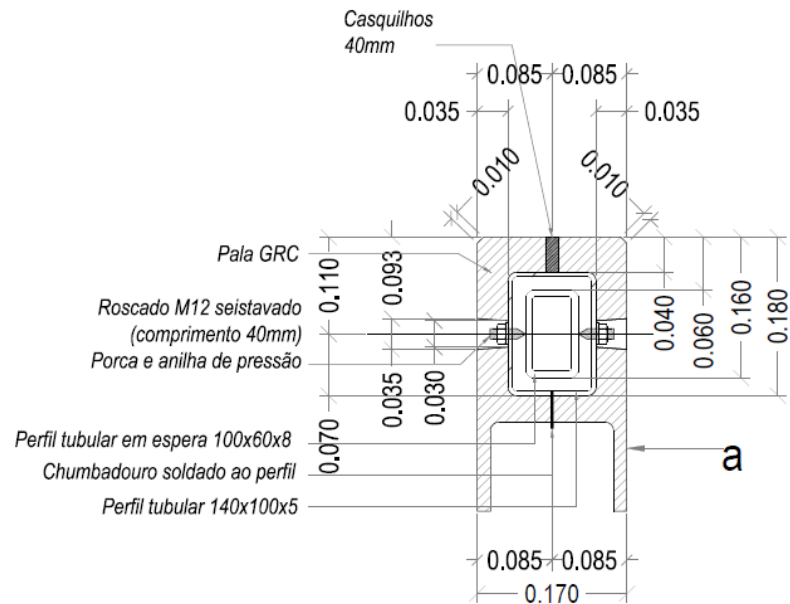


Figura 4.4 – Corte da secção transversal da Figura 4.3 (dimensões em m)

Na Figura 4.4 é possível observar dois perfis tubulares: o perfil tubular em espera, ou seja, o perfil soldado ao pilar metálico, e o perfil tubular embebido no painel de GRC. A ligação entre os dois perfis é efetuada através de parafusos. Na Figura 4.5 é mostrada a planta do painel, onde se pode observar a localização das ligações aparafusadas que efetuam a ligação entre os perfis metálicos e o painel.

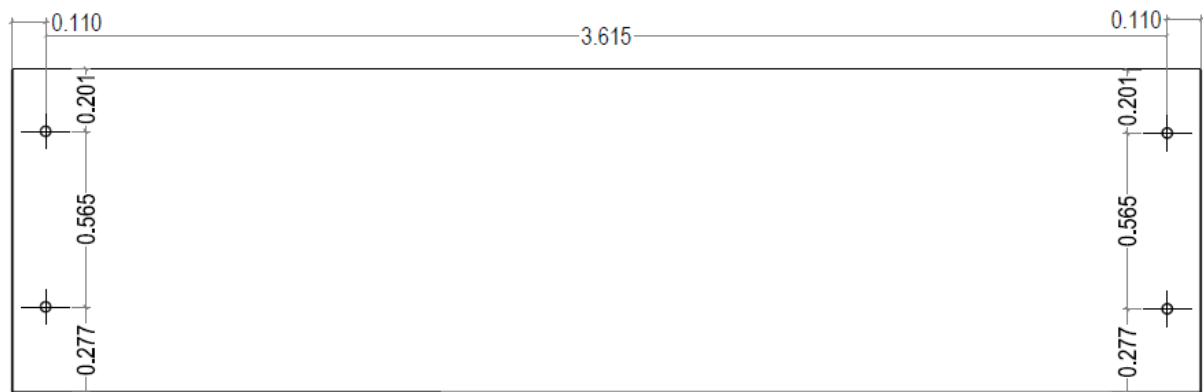


Figura 4.5 - Planta do painel. Localização das ligações aparafusadas (dimensões em m)

A lâmina de fachada é constituída por um painel monocelular, tendo em todo o seu perímetro uma casca em GRC, e núcleo oco. As lâminas são fixadas ao pilar por meio de dois perfis tubulares, posicionados nos seus topos. Os perfis tubulares representam, estruturalmente, duas consolas e são soldados ao pilar metálico, de forma a assegurar um encastramento perfeito. No tardo dos painéis e de forma a ocultar o pilar metálico e a zona de ligação entre este e os perfis tubulares horizontais, o painel tem duas abas, feitas com o mesmo material. No momento em que se proceder à montagem das lâminas, os perfis tubulares já se encontram soldados ao pilar, tendo os painéis que entrar de gaveta. A tipologia do painel é a *sandwich*, referida no segundo capítulo.

A Figura 4.6 apresenta o painel em estudo e a Figura 4.7 mostra a estrutura metálica que suporta o painel. Nesta figura é apenas visível um segmento do pilar, com altura igual ao desenvolvimento do painel.



Figura 4.6 - Painel em estudo (armazenado na posição horizontal)

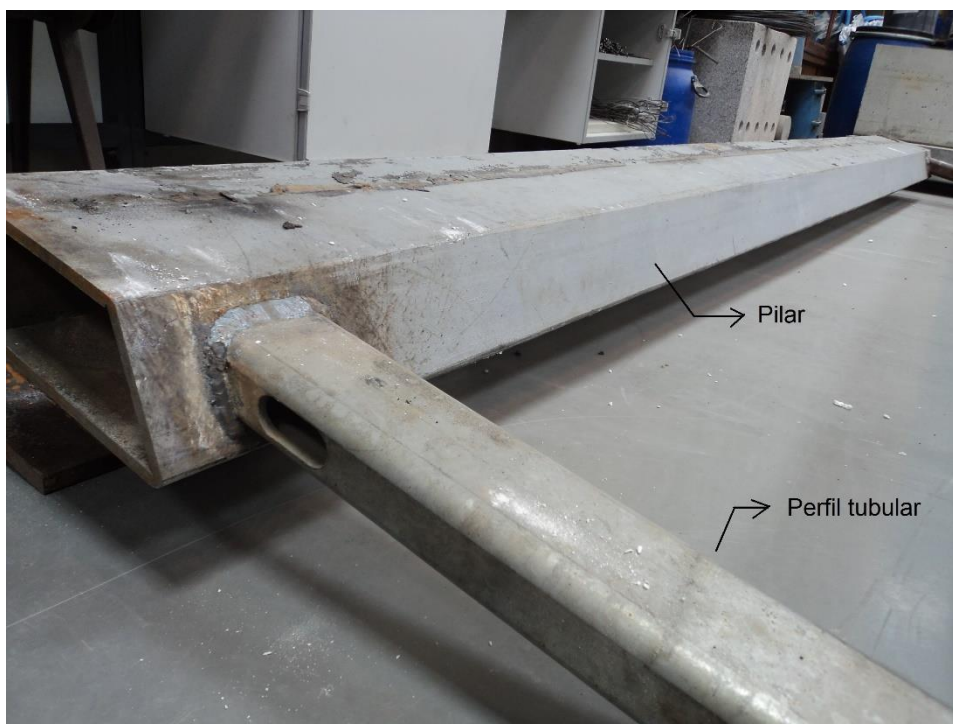


Figura 4.7 - Estrutura metálica de suporte: pilar e perfil tubular

Os painéis de estudo têm como dimensões $3,835 \times 1,045 \text{ m}^2$, em planta. Foram ensaiados quatro: o primeiro foi utilizado num ensaio preliminar e os restantes foram utilizados nos ensaios finais, com um esquema de ensaio baseado no primeiro. A Tabela 4.1 apresenta as referências dos painéis ensaiados, data de moldagem e data de ensaio dos mesmos.

Tabela 4.1 - Datas de moldagem e de ensaio dos painéis em estudo

	Referência	Data de moldagem	Data de ensaio	Idade do painel no dia do ensaio (dias)
Painel	P1	23-03-2014	08-05-2014	45
	P2	23-03-2014	30-05-2014	67
	P3	26-05-2014	06-06-2014	11
	P4	26-05-2014	06-06-2014	11

De um modo geral, o processo de fabrico dos painéis inicia-se pela pulverização de um produto descofrante na superfície dos moldes metálicos basculantes abertos. De seguida, procede-se à moldagem em *spray-up* de uma das lâminas. Após a compactação do GRC através de um rolo compressor, a cada camada de 3-4 mm até ser obtida a espessura pretendida, é colocado o aligeiramento em poliestireno expandido e os perfis metálicos tubulares que ficam embebidos no GRC. Depois, o molde metálico é fechado, consistindo numa cofragem da envolvente exterior do painel em GRC. Por fim, a parte restante do painel é moldada, através do preenchimento dos espaços vazios do molde com GRC do tipo *premix*. Para o painel P1 e para o painel P2, o método utilizado para fabrico foi uma combinação entre o *spray-up*, para a lâmina superior, e o *premix* para a lâmina inferior. No painel P3 e no painel P4, ambas as lâminas foram fabricadas por *spray-up*, e apenas foi utilizado o *premix* para colmatar os vazios existentes entre a camada projetada e o núcleo isolador em esferovite, entre as duas faces do painel. Na Figura 4.8 é mostrado o molde metálico que foi utilizado para o fabrico dos painéis.



Figura 4.8 – Molde metálico utilizado na produção dos painéis (Tavares 2014)

4.2.1. AÇÕES ATUANTES NUM PAINEL REAL E FUNCIONAMENTO ESTRUTURAL

O peso próprio do painel é suportado pelos perfis tubulares que, por sua vez, são soldados ao pilar metálico. As cargas horizontais serão suportadas pelos perfis tubulares e pelas ligações mecânicas entre estes e a lâmina de GRC.

As cargas horizontais consistem, fundamentalmente, na ação do vento. Em fase de projeto, foi concluído que a ação sísmica não era condicionante. A solicitação provocada pelo vento atuante numa determinada fachada pode ser quantificada com base em coeficientes de pressão, que dependem da sua geometria (Stathopoulos e Zhu 1990). Uma fachada feita com painéis com a configuração considerada no presente trabalho apresenta uma geometria complexa, que dificulta a quantificação dos coeficientes de pressão mais adequados. Stathopoulos e Zhu (1990) realizaram um estudo que fornece indicações sobre os coeficientes de pressão a considerar em fachadas com lâminas ou perfis verticais. Este tema não é apresentado no presente trabalho, que incide sobre a avaliação do comportamento resistente dos painéis, e não sobre a quantificação da ação atuante.

Sendo a ação do vento uma solicitação cíclica, o comportamento cíclico do GRC é também abordado no âmbito desta dissertação.

4.3. PLACAS EM GRC

Para além do ensaio dos painéis, foram também ensaiadas placas do mesmo material, mas em menor escala, com vista a caracterizar monotonicamente e ciclicamente a resistência à tração, em flexão, do GRC (Tabela 4.2). Realizaram-se duas campanhas de ensaio: a primeira sob carregamento estático crescente, e a segunda sob carregamento cíclico. O processo de fabrico das placas ensaiadas foi o *spray-up*.

Tabela 4.2 - Data de moldagem e data de ensaio das placas de GRC

Campanha	Referência	Data de moldagem	Data de ensaio	Idade das placas no dia do ensaio (dias)
1	1	01-04-2014	30-04-2014	29
2	2	01-04-2014	28-05-2014	57
	3	01-04-2014	04-06-2014	64

A descrição pormenorizada dos ensaios é feita no capítulo seguinte, ao pormenor.

5

ENSAIOS LABORATORIAIS

5.1. OBJETIVOS

O objetivo principal dos ensaios realizados foi estudar o comportamento resistente do painel e respetiva resistência do GRC.

Por conseguinte, foram realizadas dois tipos de ensaios laboratoriais: um deles relativamente ao painel e respetivo sistema de fixação, de forma a estudar o funcionamento global sob carregamento estático e distribuído, e a segunda em relação a uma série de provetes de GRC, para a caracterização do material, através de ensaios de medição da resistência por flexão, monotónicos e cíclicos. Para auxiliar a caracterização das deformações na campanha experimental para avaliação do comportamento em ensaios de flexão dos provetes de GRC na resistência à flexão, foi utilizado um sistema de medição por videogrametria.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

5.2. ENSAIOS DO FUNCIONAMENTO GLOBAL DO PAINEL

No projeto do edifício, por imposições arquitetónicas, existem painéis com diferentes comprimentos. Neste caso, não foram ensaiados os painéis mais longos mas foram testados painéis idênticos aos painéis reais, com o perfil metálico e com as duas consolas. O sistema de fixação do perfil metálico à estrutura foi adaptado laboratorialmente para simular, da melhor forma possível, as condições reais. O sistema de ensaio que suporta o painel, e o sistema de aplicação do carregamento, foi dimensionado tendo em conta os requisitos geométricos e a resistência dos materiais. Conforme já foi referido, os painéis ensaiados têm uma altura de 3,835 m. Na Figura 5.1 é apresentado um dos painéis ensaiados.

5.2.1. ENSAIO PRELIMINAR

Inicialmente, foi realizado um ensaio exploratório, a partir do qual se definiu a melhor configuração para os ensaios seguintes. Este ensaio permitiu perceber as características mais relevantes do conjunto do painel e sistema de fixação a analisar e conhecer, ainda que limitadamente, o seu comportamento.

Para o dimensionamento dos ensaios, a nível de distribuição de cargas e pontos de carregamento, foi tida em conta a situação mais desfavorável, de modo a que o ensaio sobre o painel fornecido representasse a situação equivalente ao carregamento do painel de maior altura a utilizar no edifício, cuja altura é de 4,70 m. A esta altura foi chamada o comprimento “real” do painel, L_{real} , e a altura de 3,835 m foi designada por comprimento “laboratorial”, L_{lab} . Uma vez que no edifício em causa são utilizados painéis com diferentes comprimentos, pretendeu-se criar uma relação igual entre o momento máximo e o esforço transversal máximo que ocorre no painel ensaiado no laboratório e no painel real de maior comprimento.

A carga transmitida pelo atuador durante o ensaio foi distribuída, através de elementos rígidos (perfis HEB), para quatro pontos do painel. O atuador transmite a carga a um perfil HEB300, com 2 metros de comprimento que, por sua vez, transmite a carga a dois perfis HEB180 transversais ao painel, com 1 metro de comprimento. Estes dois transferem a carga para quatro pontos do painel.

A Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam a configuração do esquema do ensaio.

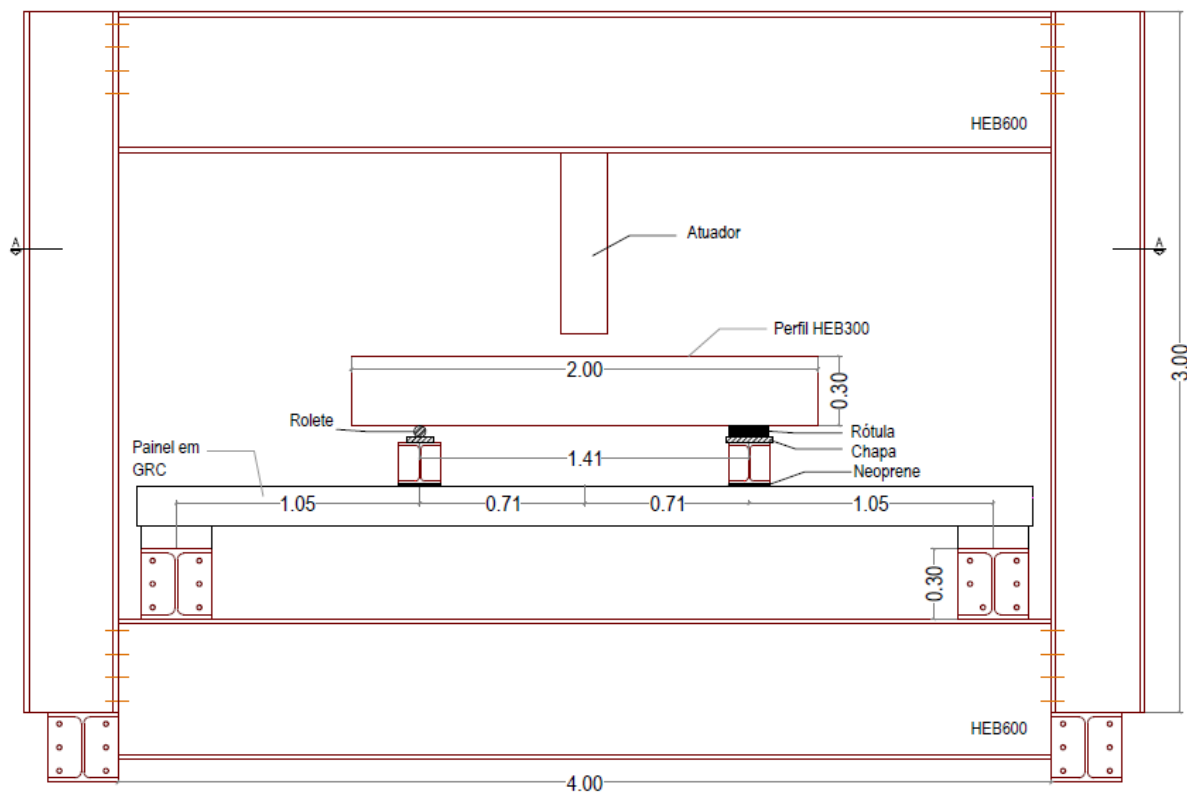


Figura 5.1 - Vista lateral do esquema do ensaio preliminar (dimensões em m)

Num dos apoios entre o perfil HEB300 e o perfil HEB180 foi utilizado um rolete, cuja altura é de 50 mm, e uma chapa, com 20 mm de altura, como aparelhos de apoio. No outro apoio foi utilizada uma chapa com as mesmas dimensões e uma rótula com 50 mm de altura. Entre os perfis HEB 180 e o painel foram utilizadas lâminas de neoprene com 8 mm de espessura (duas por cada perfil). Para garantir o seu correto funcionamento, foi verificado que as dimensões dos aparelhos de apoio em neoprene simples garantem a verificação de segurança face às cargas atuantes e rotações impostas. Na Figura 5.3 é representada o esquema de ensaio em planta.

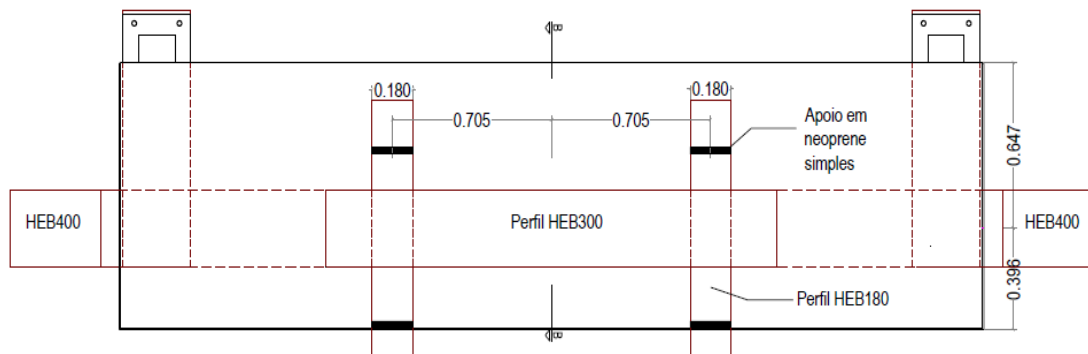


Figura 5.2 – Corte A-A da Figura 5.1. Vista superior do esquema de ensaio (dimensões em m)

A posição dos apoios e dos pontos de aplicação de carga foram posicionados no painel para que transmitissem a força para as nervuras. A Figura 5.3 mostra o corte do esquema.

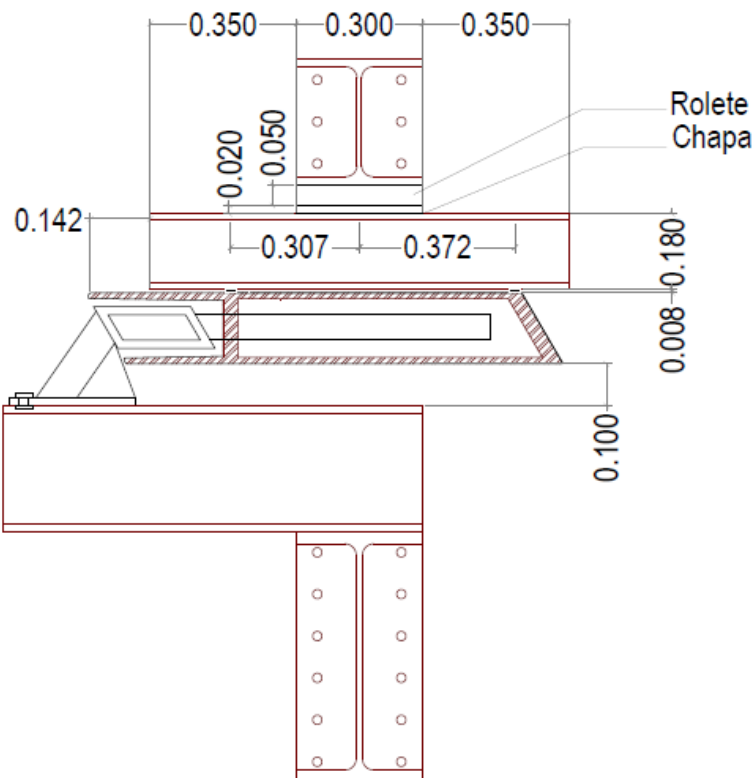


Figura 5.3 - Corte B-B da Figura 5.2 (dimensões em m)

A distância entre os dois perfis HEB180, “a”, foi deduzida a partir da relação entre o comprimento “real” do painel e o comprimento do modelo de ensaio, conforme é demonstrado a seguir, para garantir igual relação entre o momento máximo e esforço transversal máximo no painel ensaiado e no painel real de maior comprimento. Na Figura 5.4 é mostrado o esquema no painel com comprimento real. Na Figura 5.5 é deduzida a situação equivalente para o painel com comprimento de ensaio.

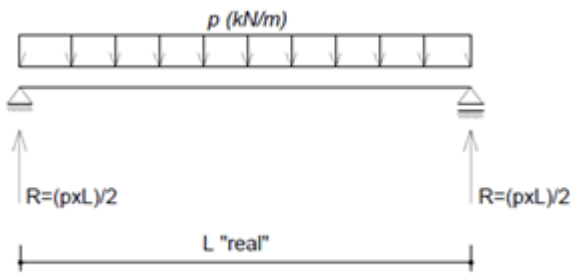


Figura 5.4 - Carga distribuída no painel real

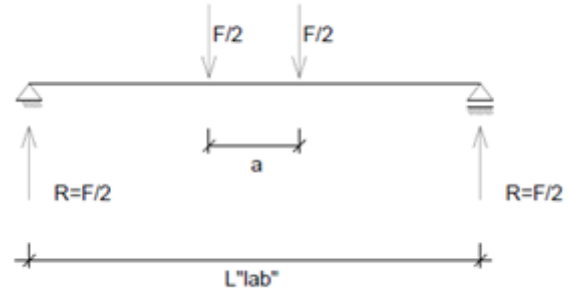


Figura 5.5 – Distribuição de forças equivalente no painel de ensaio

Da Figura 5.4 vem que (5.1), (5.2):

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p \times L^2}{8} \quad (5.1)$$

$$\text{Em que } L = L_{real} = 4,415 \text{ m}$$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{R} = \frac{p \times L^2 \times 2}{8 \times p \times L} = \frac{L}{4} = \frac{L_{real}}{4} \leftrightarrow \frac{M_{m\acute{a}x}}{R} = \frac{4,415}{4} = 1,104 \quad (5.2)$$

Para a Figura 5.5 tem-se que:

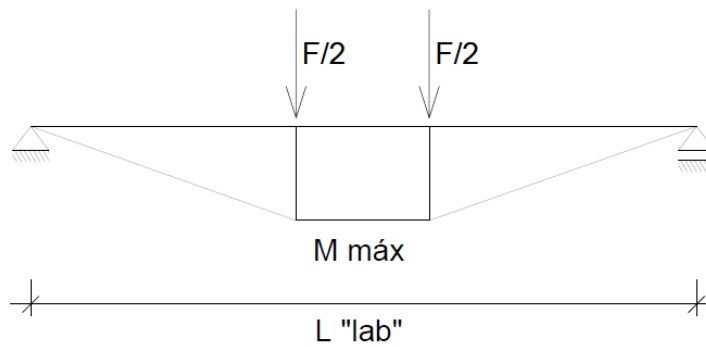


Figura 5.6 - Diagrama de momentos para a Figura 5.5

Em função do cálculo do momento máximo (Figura 5.6), determinou-se a distância “a” entre as duas forças (5.3).

$$M_{m\acute{a}x} = 1,104 \times R = 1,104 \times \frac{F}{2} = 0,5519 \times F \quad (5.3)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{F}{2} \times \frac{L_{lab}}{2} - \frac{F}{2} \times \frac{a}{2} = 0,5519 \times F \leftrightarrow \frac{F}{2} \times \frac{3,615}{2} - \frac{F}{2} \times \frac{a}{2} = 0,5519 \times F$$

$$\therefore a = 1,41 \text{ m}$$

Relativamente ao raciocínio da distribuição de cargas, foram determinadas as distâncias a partir das quais a força proveniente do atuador era transferida ao painel. Considerando uma carga distribuída a atuar sobre o painel e que atua sobre as duas faces e, tendo também em conta que a força é transmitida para as nervuras da secção transversal, existe uma distribuição “desigual” dessa carga devido à diferença do comprimento de influência em cada lado (Figura 5.7). Assim, de forma a equilibrar essa distribuição foram determinadas duas distâncias diferentes, “a” e “b”, entre as quais se transmitia a força de ensaio, de modo a que a percentagem de carga fosse de 55% para uma nervura e de 45% para a outra, cujo comprimento de influência é menor (Figura 5.8).

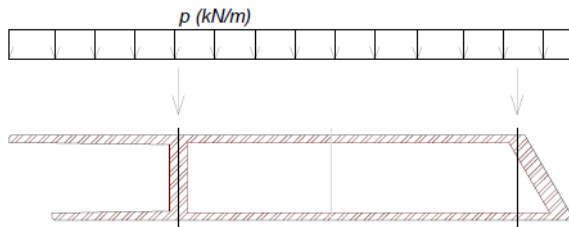


Figura 5.7 - Carga uniformemente distribuída

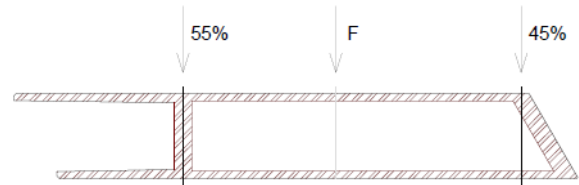


Figura 5.8 - Distribuição de cargas considerada no ensaio laboratorial

Quanto à fixação, esta foi dimensionada no sentido de se aproximar o máximo possível à ligação do painel à estrutura em obra. Desta forma, foi garantida a rigidez através da soldadura de chapas e ligações aparafusadas dimensionadas para a carga atuante (Figura 5.9).



Figura 5.9 – Ligação entre o perfil metálico em forma de losango e o pórtico de reação

O atuador utilizado tinha a capacidade máxima de 150 kN (Figura 5.10) e o controlo da velocidade de aplicação de carga foi feito por deslocamento com uma taxa de crescimento igual a 1 mm/min.

A aquisição de dados e o controlo do ensaio foi feita com recurso ao *software Dyna Tester*, da autoria do IDMEC-FEUP.



Figura 5.10 - Atuador utilizado para o ensaio

5.2.2. ENSAIOS COM QUATRO PONTOS DE APLICAÇÃO DE CARGA

A partir do ensaio preliminar, foi estudado um segundo tipo de ensaio no qual considerou uma maior distribuição das cargas. Os painéis 2, 3 e 4 foram ensaiados segundo esta metodologia. O atuador e a unidade de aquisição de dados utilizados foram os mesmos.

Neste ensaio, a força do atuador é transmitida sobre um perfil HEB 300, com 2 metros de comprimento, que, por sua vez, apoia em duas vigas de madeira. Consecutivamente, estas distribuem a força atuante sobre quatro zonas do painel a partir de mais quatro vigas de madeira.

Na Figura 5.11 e na Figura 5.12 são mostrados o esquema lateral do ensaio e a planta do esquema, respetivamente. Na Figura 5.13 é apresentado o corte vertical. Os aparelhos de apoio utilizados foram todos em neoprene simples.

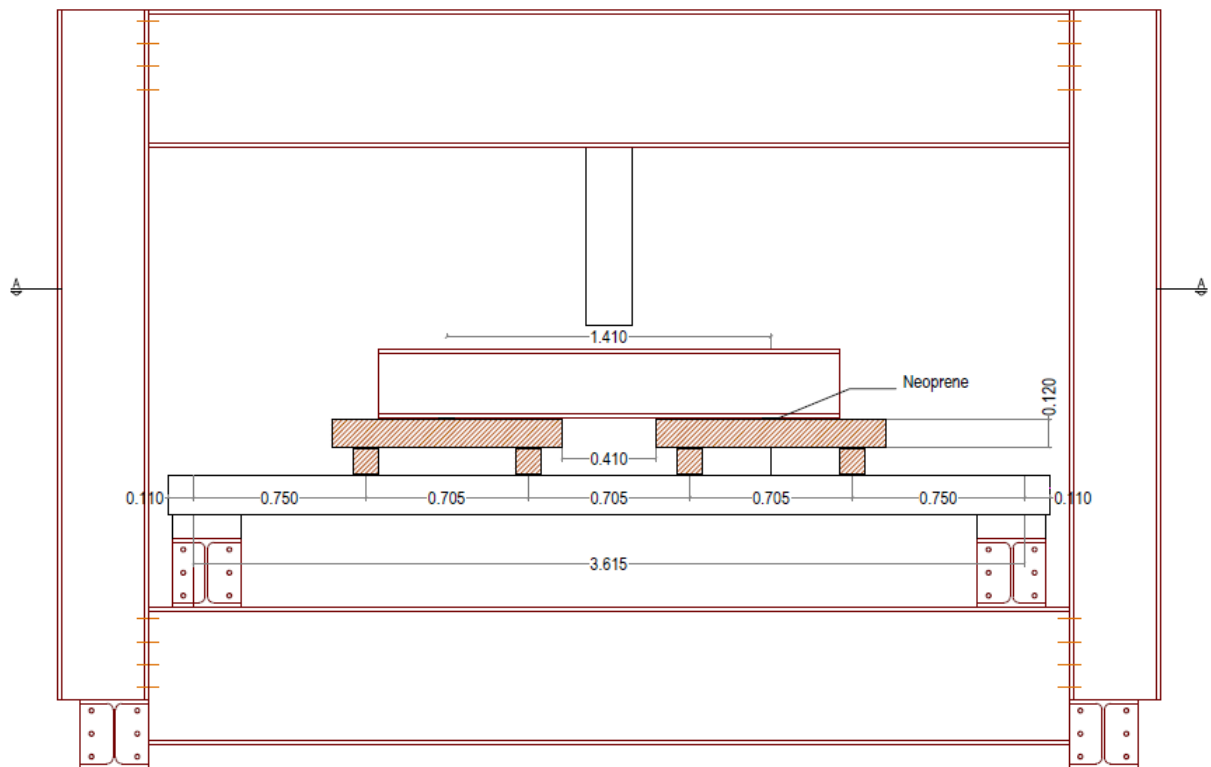


Figura 5.11 - Vista lateral do esquema de ensaio (dimensões em m)

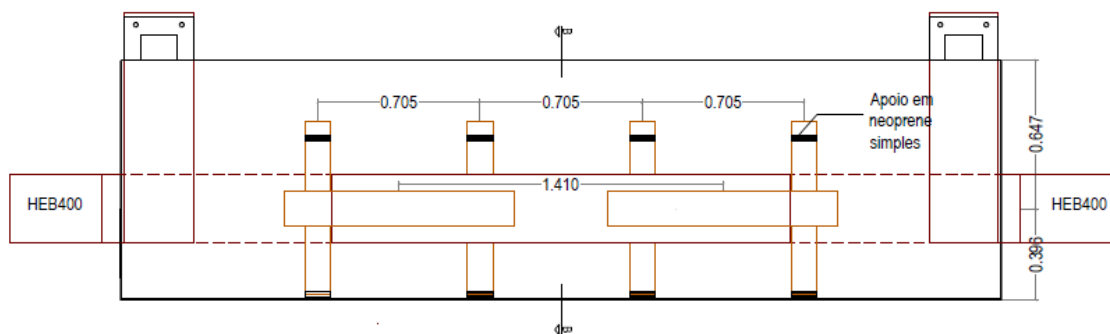


Figura 5.12 – Corte A-A da Figura 5.10. Vista superior do esquema de ensaio (dimensões em m)

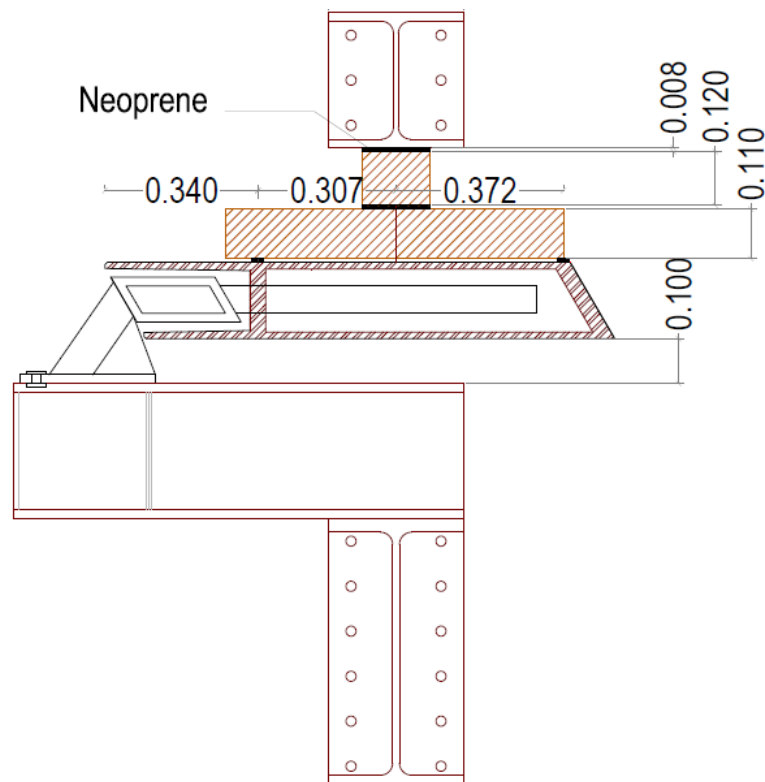


Figura 5.13 - Corte B-B da Figura 5.12 (dimensões em m)

Tal como para o primeiro ensaio, a distância entre as vigas de madeira, neste caso, foram previamente calculadas com base no mesmo raciocínio, para que a transmissão de cargas no painel de ensaio representasse a situação equivalente para o painel “real”.

Na Figura 5.14 é apresentado o esquema de distribuição de forças no painel de comprimento real e na Figura 5.15 é apresentada a situação equivalente para o painel com comprimento mais pequeno.

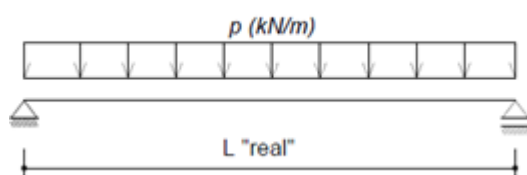


Figura 5.14 – Carga distribuída no painel real

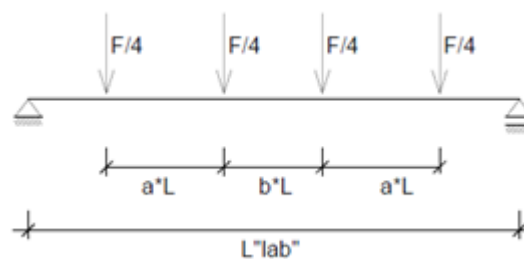


Figura 5.15 - Distribuição de forças no painel de ensaio

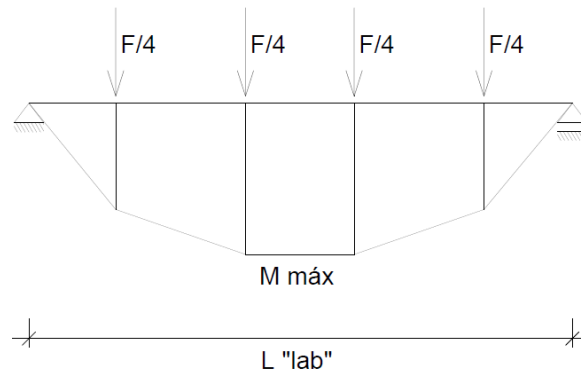


Figura 5.16 - Diagrama de momentos para a Figura 5.15

Da Figura 5.14 vem que (5.4) :

$$M_{máx} = \frac{p \times L^2}{8} \quad (5.4)$$

Para a Figura 5.15 tem-se que (5.5):

$$M_{máx} = \frac{F}{2} \times (a + b) - \frac{F}{4} \times b \quad (5.5)$$

Por fim, de acordo com as equações (5.6):

$$a \times L + b \times L = 0,705 \quad (5.6)$$

Para medição dos deslocamentos foram colocados 6 LVDTs (do inglês *Linear Variable Differential Transformer*), em posições transversalmente opostas (Tabela 5.1 e Figura 5.17). Os LVDTs P3 e P4 e o seu sistema de fixação são representados na Figura 5.18.

Tabela 5.1 - LVDTs utilizados para a medição de deslocamentos durante o ensaio

Referência do LVDT	Campo de medição (mm)	Posição
P1	± 20	1
P2	± 20	2
P3	± 40	3
P4	± 40	4
P5	± 20	5
P6	± 20	6



Figura 5.17 - Posicionamento dos LVDTs em planta no painel



Figura 5.18 - - LVDTs utilizados no ensaio, na posição P3 e P4

5.3. ENSAIOS MONOTÓNICOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC

Os objetivos para a realização desta campanha de ensaios foram de avaliar a viabilidade e interesse em utilizar a técnica de videogrametria, descrita mais à frente, e de avaliar o comportamento monotónico das placas de GRC. Os ensaios experimentais da medição da resistência à flexão foram baseados nas indicações da Norma Portuguesa NP EN 1170-5 (IPQ 2000). Este tipo de ensaio é dos mais relevantes na determinação da resistência mecânica do GRC, quando sujeito a ações importantes como o vento em painéis de fachada. A Norma estabelece um método de ensaio que permite identificar as características de resistência e deformabilidade no LOP e no MOR, de materiais sujeitos à flexão. Possibilita também avaliar indiretamente a resistência à tração do material em peças cujo esforço predominante é a flexão. Para este ensaio foram utilizados provetes de GRC retirados de placas do mesmo material usado no fabrico dos painéis. A Tabela 5.2 apresenta o número de provetes ensaiados e as suas dimensões.

Tabela 5.2 - Provetes submetidos ao ensaio monotónico de resistência à flexão do GRC

	Série ensaiada	Nº Provetes
Placa 1	Direção B	3
	325x50x20 mm	
	Direção T	3
	325x50x20 mm	

5.3.1. SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VIDEOGRAMETRIA

Para esta campanha de ensaios foram ensaiadas placas de GRC no sentido de caracterizar as extensões obtidas através dos ensaios de flexão, com recurso a sub-rotinas em MATLAB e à gravação em vídeo com uma câmara IDS® uEye 1240 ML-M-GL.

Este sistema de medição não intrusivo possibilita a medição contínua dos deslocamentos de múltiplos pontos, ao contrário do que acontece com os habituais sensores mecânicos e elétricos, permitindo múltiplas leituras. De facto, na decorrência da evolução digital, o desenvolvimento deste sistema tem-se revelado bastante útil quando aplicado a áreas como a Engenharia Civil, apresentando vantagens em relação aos sistemas de medição tradicionais (Santos 2012). Para além destas características, a videogrametria permite ter um campo de medição adaptável e uma frequência de aquisição ajustável, com boa exatidão e precisão.

A videogrametria trata-se de uma extensão da fotogrametria, em que podem ser utilizadas varias câmaras a analisar o mesmo elemento em pontos distintos ou apenas uma câmara. Neste caso, foi utilizada uma câmara a observar a secção central do elemento, em múltiplos pontos. Os pontos, igualmente espaçados e aproximadamente com o mesmo tamanho, são inicialmente marcados através de uma grelha na secção que se pretende analisar (Figura 5.19 e Figura 5.20).

Primeiramente, foram extraídas as imagens do vídeo através do programa Free Video to JPG Converter (DVDVideoSoft, 2011). A partir de uma determinada frequência definida previamente, o programa descodifica o vídeo continuamente numa série de imagens, cada uma com o tamanho, em pixéis, do vídeo original.



Figura 5.19 - Marcação do provete a partir da grelha



Figura 5.20 - Provete marcado

Depois, é necessário corrigir a distorção das imagens recorrendo ao processo de calibração de imagem.

Seguidamente é calculado o deslocamento entre imagens através da correlação de imagens digitais (DIC – *Digital Image Correlation*) a partir de técnicas matemáticas e estatísticas. De um modo geral, o princípio de funcionamento da DIC baseia-se em fazer a correspondência entre duas imagens semelhantes, mas deslocadas entre si de um deslocamento que se pretende determinar (Santos 2012).

A filtragem do sinal surge pela necessidade de eliminar as oscilações aleatórias nos sinais provenientes do ruído resultante dos componentes físicos do sistema. Para tal, e aplicando ao caso da câmara de filmar, o ruído foi eliminado de forma digital a partir de filtros numéricos, como a média móvel ou média móvel pseudo-gaussiana, com 5 pontos.

Para o tratamento dos dados, nomeadamente para passar por cada uma das fases descritas, foi utilizado um *software* interativo de programação numérica – MATLAB R2013a. Através de uma série de sub-rotinas (Figura 5.21) obteve-se as coordenadas dos pontos para cada *frame*. Os resultados finais foram determinados a partir de um pós-processamento desses dados em Excel.

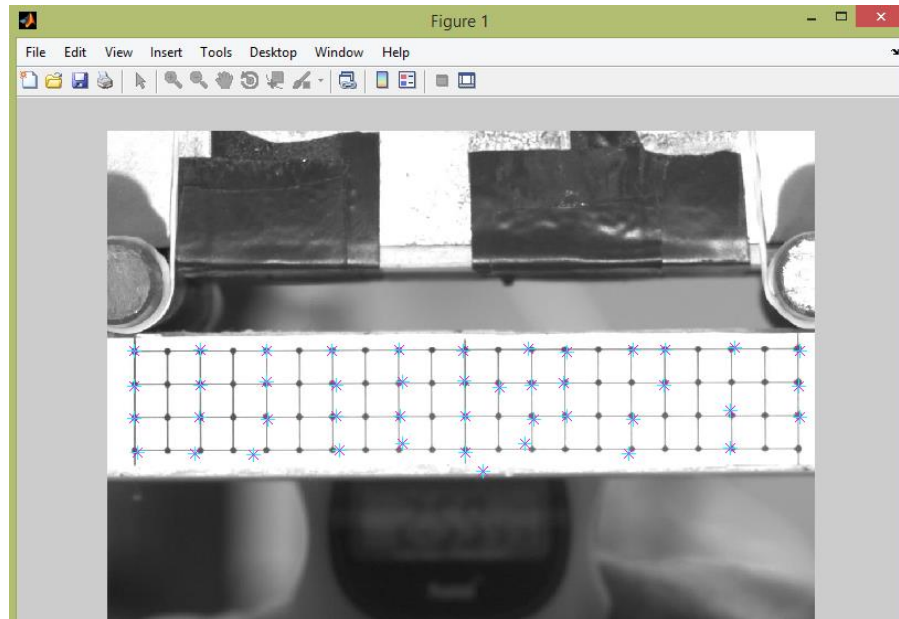


Figura 5.21 - Sub-rotina da correção da distorção

5.3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Os aparelhos e acessórios necessários à realização deste ensaio são: uma máquina de ensaio de flexão cuja precisão satisfaça as exigências da classe 2 especificadas na ISO 7500-1, provida de dispositivo de flexão de quatro pontos (o diâmetro dos apoios não deve ser inferior a 6 mm e distância entre apoios ajustável) e de um defletómetro, com precisão de 0,01 mm, localizado preferencialmente no eixo transversal de simetria da máquina de ensaio - a máquina de ensaio deve ser provida de um sistema que permita o registo das cargas e deslocamentos durante o ensaio; duas placas com aproximadamente (500x800) mm feitas de material liso, de fácil limpeza; um recipiente de fundo plano com sensivelmente (500x200x100) mm, preenchido com água a uma temperatura constante de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$; uma régua com exatidão de 0,5 mm; um paquímetro com precisão de 0,1 mm; uma estufa ajustável de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$; uma balança com exatidão de 0,1 g.

As placas fornecidas para ensaio foram moldadas segundo as mesmas condições utilizadas na produção (*spray-up*). Após a desmoldagem, as placas, já cortadas, devem ser armazenadas nas mesmas condições de cura utilizadas até à idade de 6 dias. Neste caso e no âmbito deste trabalho, não era relevante para a campanha experimental a idade dos provetes, pelo que não se realizaram os ensaios aos 7 e aos 28 dias.

O procedimento seguinte foi extrair 8 provetes de cada uma das placas, conforme a Figura 5.22, segundo duas direções diferentes. No caso desta campanha, foram ensaiados 6 provetes de cada placa, 3 em cada direção (Figura 5.23).

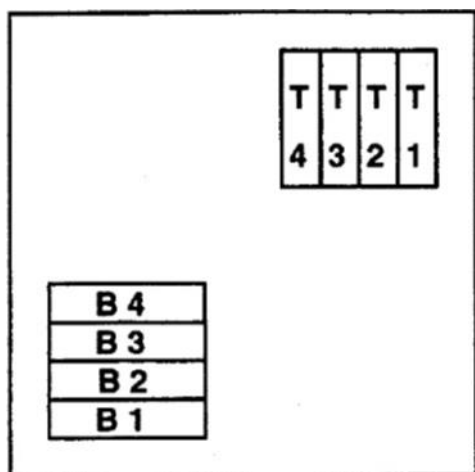


Figura 5.22 - Marcação dos provetes de acordo com a norma



Figura 5.23 - Provetes retirados da placa

Os provetes foram referenciados pelo número da placa e pela designação da figura, como por exemplo, 1B1, ou seja provete B1 da placa 1.

Os provetes são cortados a (50^{+1}_0) mm das extremidades, e com um comprimento em função da espessura da placa. Na Tabela 5.3 é apresentado o critério do comprimento de acordo com a norma.

Tabela 5.3 - Comprimento dos provetes em função da espessura (IPQ 2000)

Espessura d	$\leq 6,7$	6,8 a 10,0	10,1 a 12,5	$\geq 12,6$
Comprimento l com tolerância de $^{+25}_0$ mm	160	225	275	325

Uma vez que a espessura da placa é de aproximadamente 20 mm, o comprimento adotado foi de 325^{+25}_0 mm. A largura é de 50 ± 2 mm. Após o corte dos provetes e antes da colocação em água, foram marcados os pontos necessários para a utilização do sistema de vídeo.

Antes da realização do ensaio, os provetes devem permanecer durante 24 horas no recipiente cheio de água. O ensaio deve ser realizado dentro da primeira $\frac{1}{2}$ hora da retirada dos provetes do recipiente e os provetes devem ser limpos com um pano húmido de forma a remover a água superficial. De seguida, são medidos os comprimentos de cada provete e posicionados na máquina de ensaio, como mostra a Figura 5.24, sobre os apoios afastados em função do comprimento do provete. A Tabela 5.4 mostra a distância a adotar entre os apoios tendo em conta o comprimento do provete.

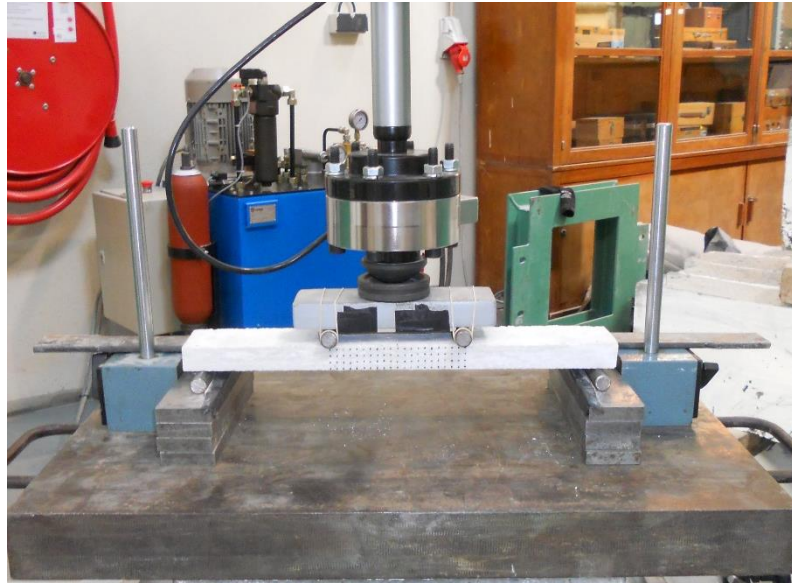


Figura 5.24 – Esquema do ensaio de resistência à flexão do GRC utilizado

Tabela 5.4 - Afastamento entre apoios em função do comprimento do provete (IPQ 2000)

Comprimento l	160	225	275	325
Afastamento entre apoios L	135	200	250	300

Para configurar um esquema de ensaio de acordo com a norma, foram posicionados dois roletes nos encaixes mais afastados da peça, para que a distância entre os eixos fosse de 300 mm. O provete é centrado relativamente à peça superior do dispositivo.

Os provetes 1 e 3 foram ensaiados com a face moldada para baixo e o provete 2 foi ensaiado com a face moldada para cima. Para iniciar o ensaio, a velocidade é ajustada de uma das seguintes formas: controlo da carga ($10 \pm 0,3$) N/s ou controlo do deslocamento ($0,03 \pm 0,003$) mm/s, como foi neste caso. O ensaio é levado até à rotura dos provetes, no mínimo até que $0,9F_{MOR}$ seja atingido. Depois, é medida a espessura, largura e comprimento do provete na zona de rotura, com 0,1 mm de exatidão. A massa húmida também é registada através da pesagem do provete, em gramas. Por fim, a massa seca é obtida através da massa constante, depois de colocar os provetes na estufa ventilada, (105 ± 5) °C, em que a diferença entre duas pesagens consecutivas é inferior a 0,1 %.

Ao mesmo tempo que o ensaio prossegue, a câmara filma o seu decorrer (Figura 5.25).



Figura 5.25 - Equipamento de filmagem e aquisição de vídeo durante o ensaio de resistência à flexão do GRC

Os registos do ensaio expressam valores que correspondem aos deslocamentos e força, dos quais resulta um gráfico do tipo carga/deformação no limite de proporcionalidade e na rotura. O deslocamento Δ_{LOP} e a carga F_{LOP} são determinados pelo gráfico. No limite de proporcionalidade o comportamento do material deixa de ser elástico e corresponde ao ponto onde se altera o declive do gráfico. O deslocamento Δ_{MOR} e a carga F_{MOR} na rotura correspondem ao valor máximo da carga registada (Figura 5.26).

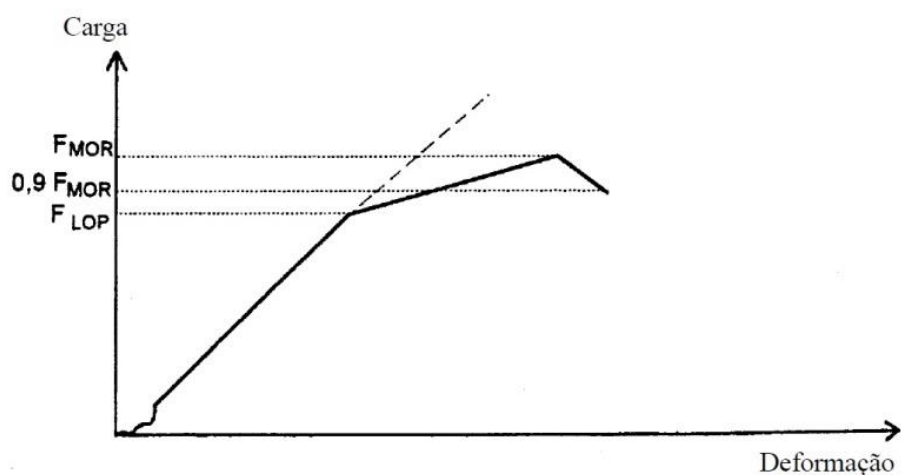


Figura 5.26 - Diagrama carga/deformação (IPQ 2000)

Os valores das deformações, ϵ_{LOP} e ϵ_{MOR} , e tensões, σ_{LOP} e σ_{MOR} , são dados pelas seguintes expressões (5.7), (5.8), (5.9), (5.10):

$$\varepsilon_{LOP} = \frac{27}{5} \times \frac{\Delta_{LOP} \times d}{L^2} \quad (5.7)$$

$$\sigma_{LOP} = \frac{F_{LOP} \times L}{b \times d^2} \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_{MOR} = \frac{27}{5} \times \frac{\Delta_{MOR} \times d}{L^2} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{MOR} = \frac{F_{MOR} \times L}{b \times d^2} \quad (5.10)$$

A constante 27/5 é utilizada porque nos ensaios o deslocamento é medido para a distância entre o apoio superior e o apoio inferior (IPQ 2000).

O teor de humidade, W, expresso em percentagem de massa, é determinado através da equação (5.11):

$$W = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (5.11)$$

5.4. ENSAIOS CÍCLICOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC

Para analisar o comportamento sob carregamento cíclico do GRC foram utilizadas placas com as mesmas características das ensaiadas para a resistência à flexão. Atendendo ao tempo disponível para a realização deste trabalho, os ensaios foram apenas de carácter exploratório, sem pretender caracterizar de modo exaustivo a resistência à fadiga do material. Foram ensaiados 12 provetes das placas 2 e 3, 6 por cada uma e 3 segundo cada direção, cujas dimensões eram as mesmas dos que foram obtidos da placa 1. A Tabela 5.5 apresenta o número de provetes ensaiados por placa e suas dimensões.

Tabela 5.5 - Provetes submetidos ao ensaio cíclico		
	Série ensaiada	Nº Provetes
Placa 2	Direção B 325x50x20 mm	3
	Direção T 325x50x20 mm	3
Placa 3	Direção B 325x50x20 mm	3
	Direção T 325x50x20 mm	3

Este ensaio foi realizado segundo dois tipos de carregamento. Inicialmente os provetes foram carregados monotonicamente até um deslocamento previamente imposto (Figura 5.27), e depois procedeu-se ao carregamento cíclico sobre os mesmos (Figura 5.28). Para os provetes da placa 2, foi considerado um deslocamento limite igual a 4 mm, e para os provetes da placa 3 um deslocamento limite igual a 3 mm. Os deslocamentos limite são justificados no capítulo seguinte.

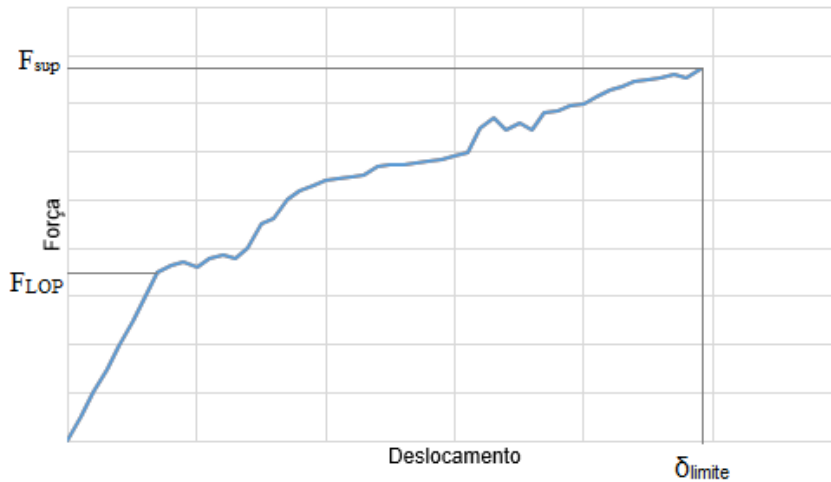


Figura 5.27 - Ensaio monotónico sobre o provete de GRC até um deslocamento pré-definido

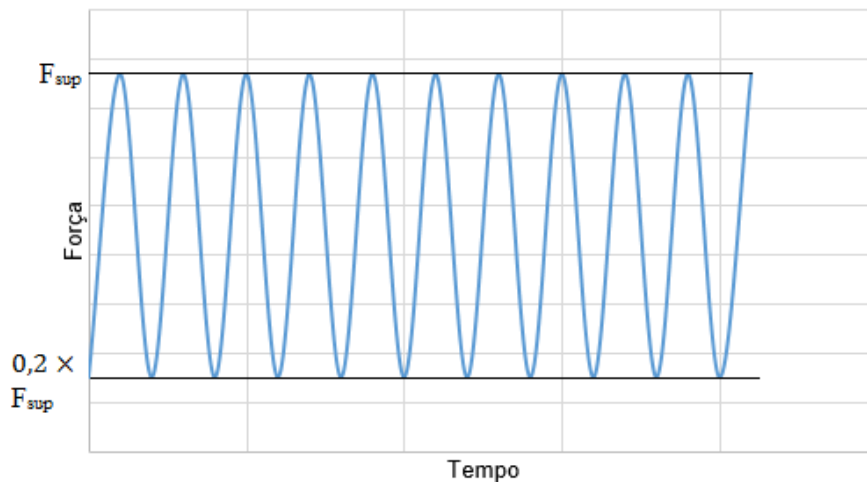


Figura 5.28 – Ensaio cíclico sobre o provete de GRC

Tendo em conta as figuras acima, vem que a amplitude do ensaio é definida por (5.12):

$$Amplitude = \frac{F_{sup} - 0,2 \times F_{sup}}{2} \quad (5.12)$$

O carregamento monotónico foi realizado com imposição de deslocamento. Para a parte seguinte, o procedimento sinusoidal, o controlo da velocidade foi feito por força. A frequência de aquisição imposta foi de 2 Hz.

Conforme foi feito para os ensaios de resistência à flexão, os provetes 1 e 3 foram ensaiados com a face moldada para baixo, e o 2 com a face moldada para cima. A Figura 5.29 mostra o decorrer do ensaio cíclico para um dos provetes.

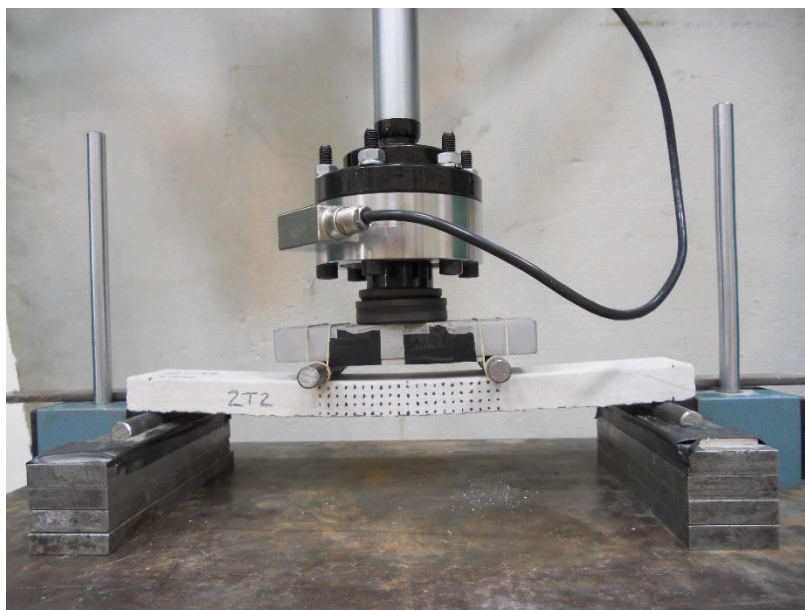


Figura 5.29 - Provede 2T2 a ser ensaiado ciclicamente

Os ensaios terminaram quando foi atingida a rotura do provede por carregamentos cíclicos (Figura 5.30).

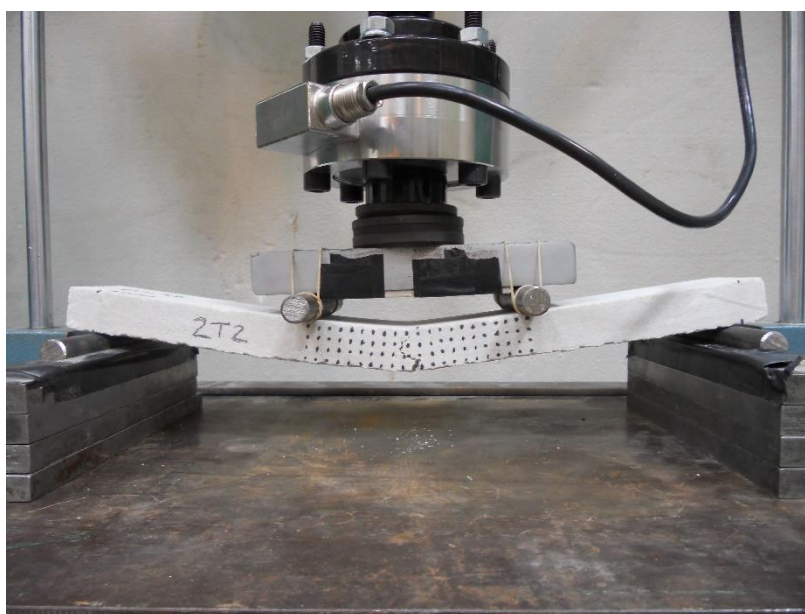


Figura 5.30 - Rotura do provede 2T2 por carregamento cíclico

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MONOTÓNICO

6.1.1. RESULTADOS DO ENSAIO DO FUNCIONAMENTO GLOBAL DO PAINEL

Conforme já foi referido no capítulo anterior, o ensaio do painel 1 decorreu segundo a configuração do ensaio preliminar, com a carga aplicada ao longo de duas linhas (Figura 6.1).

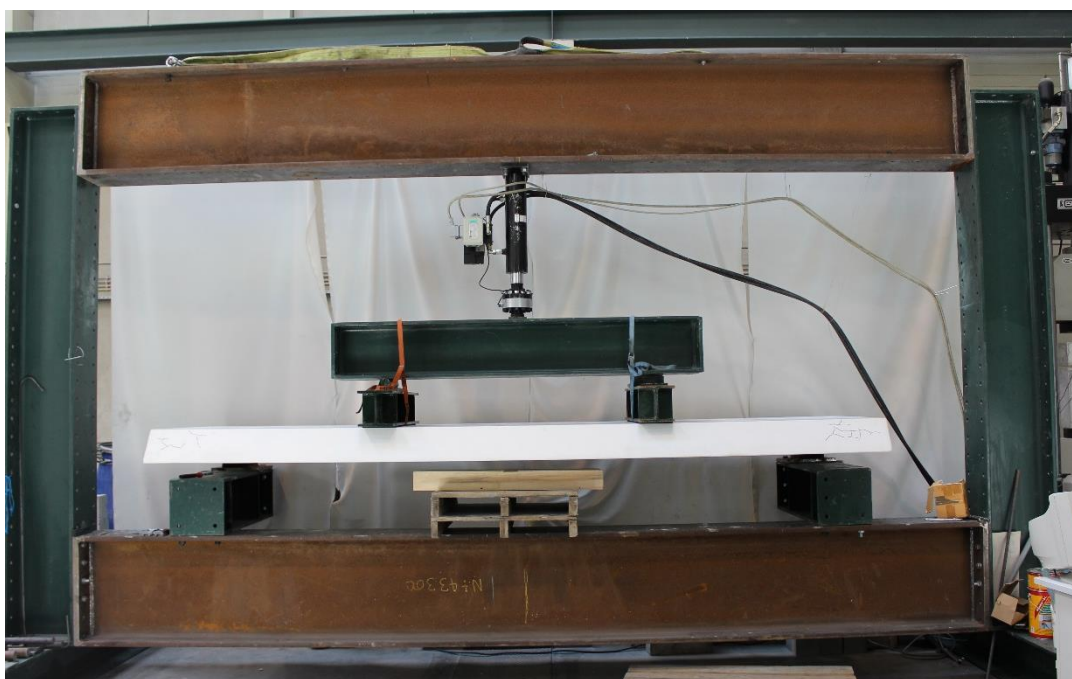


Figura 6.1 - Ensaio preliminar do painel P1



Figura 6.2 – Abertura da fenda próximo do ponto de carga direito

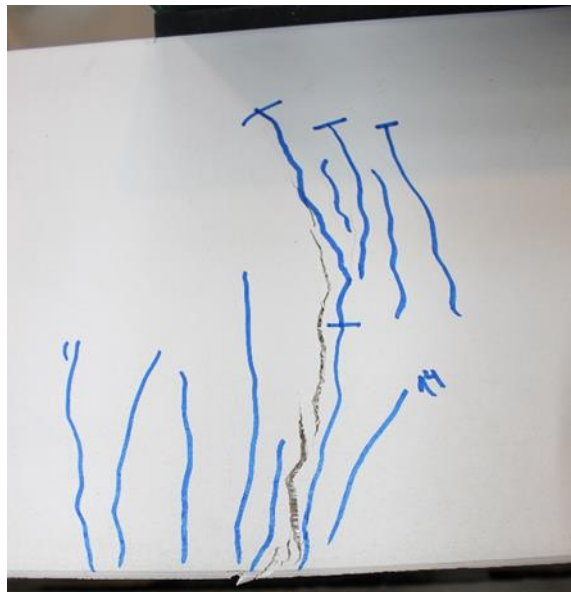


Figura 6.3 – Modo de rotura do painel

Na Figura 6.2 é mostrada a localização da fenda que condicionou a rotura no painel. Na Figura 6.3 é mostrado um pormenor do padrão de fendilhação na nervura lateral do painel.

A Figura 6.4 apresenta o gráfico que relaciona o momento fletor a meio vão com o correspondente avanço do atuador. O painel foi ensaiado aos 45 dias de idade do GRC.

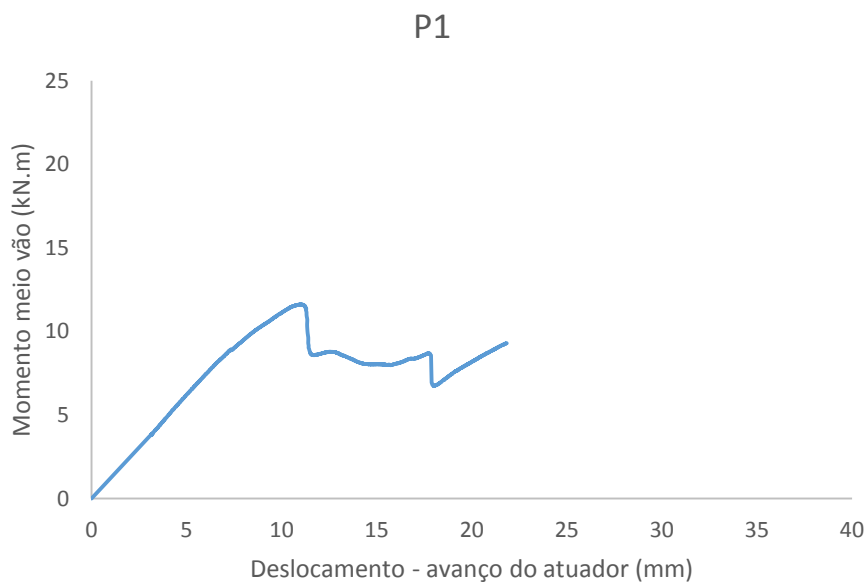


Figura 6.4 - Diagrama momento fletor máximo/deslocamento para o painel P1

Para calcular o momento fletor aplicado em cada instante, foi determinado o peso dos elementos sobrepostos ao painel durante o ensaio. O momento fletor máximo é igual a 11,619 kN.m. Antes de alcançar a rotura, a configuração da curva é, praticamente, linear. Observa-se, no entanto, uma pequena descontinuidade, para um momento fletor a meio vão igual a 8,869 kN.m, correspondente à abertura da

primeira fissura. Depois de atingida a resistência máxima, a força aplicada pelo atuador decresce até que, mais tarde, cresce novamente. O primeiro decréscimo acentuado da capacidade resistente deve-se à propagação da fenda visível nas Figuras 6.2 e 6.3. Verifica-se que o posterior aumento da capacidade resistente (sem, contudo, atingir a resistência verificada antes do primeiro ramo descendente) resulta do apoio da lâmina de GRC sobre o perfil tubular em forma de losango. Não se verifica qualquer evidência de cedência na estrutura metálica (perfis tubulares) de suporte do painel.

Conforme já tinha sido referido no capítulo 4, a lâmina de GRC mais tracionada durante o ensaio (lâmina inferior) foi realizada, quase integralmente, através do método *premix*. Este facto pode influenciar o comportamento resistente ocorrido durante o ensaio, atendendo às diferenças de comportamento esperadas para elementos feitos pelo método *premix* ou pelo método *spray-up*.

Através da observação das Figuras 6.2 e 6.3, é de notar que a fenda que determina a rotura ocorre sob uma das linhas de aplicação de carga. Assim, o facto de a carga total ser introduzida apenas ao longo de duas linhas poderia influenciar as conclusões a retirar do ensaio. Isto é, o carregamento ao longo de duas linhas pode não reproduzir o comportamento do painel sob ação de uma carga uniformemente distribuída. Deste modo, foi decidido realizar os ensaios definitivos com quatro linhas de introdução de carga. Pelos mesmos motivos, foi decidido não considerar os resultados do painel P1 na análise global dos resultados.

6.1.2. RESULTADOS DO ENSAIO COM QUATRO PONTOS DE APLICAÇÃO DE CARGA

Os ensaios dos painéis 2, 3 e 4 decorreram com a segunda configuração, com a carga aplicada em quatro linhas do painel.

O peso dos elementos dispostos sobre os painéis durante cada ensaio foram considerados na contabilização da força nas quatro linhas, para determinação do momento fletor a meio vão. Comparativamente com o ensaio preliminar, o peso sobre cada painel neste ensaio foi consideravelmente inferior.

Os diagramas momento fletor a meio vão – deslocamento para os três painéis são representados de seguida. São representadas as curvas relativas ao deslocamento correspondente à progressão do atuador e as curvas referentes aos deslocamentos registados pelos 6 LVDTs instalados. A Figura 6.5 representa os resultados para o painel 2, ensaiado aos 67 dias de idade do GRC.

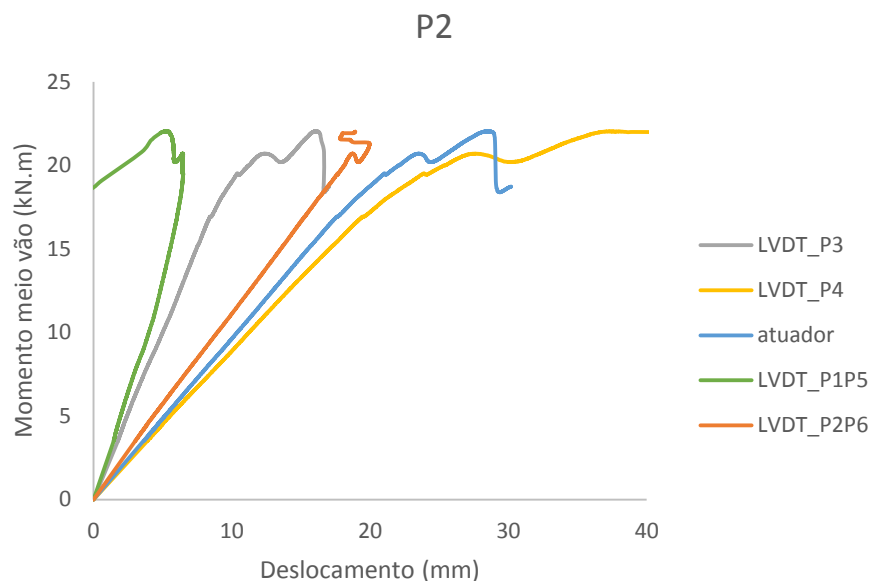


Figura 6.5 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P2

Atendendo às curvas obtidas, é possível observar que o deslocamento máximo é registado pelo LVDT P4, localizado a meio vão e afastado do perfil metálico em forma de losango, seguido pelo deslocamento registado pelo atuador. A rotura foi atingida quando o momento máximo atingiu o valor de 22,036 kN.m.

Uma vez que os deslocamentos registados pelos LVDTs localizados nos alinhamentos de apoio apresentaram valores idênticos, foi calculada uma média entre os dois LVDTs em posições análogas, isto é, uma média entre os deslocamentos registados pelo LVDT P1 e o LVDT P5 (Figura 6.6), e pelo LVDT P2 e o LVDT P6 (Figura 6.7).

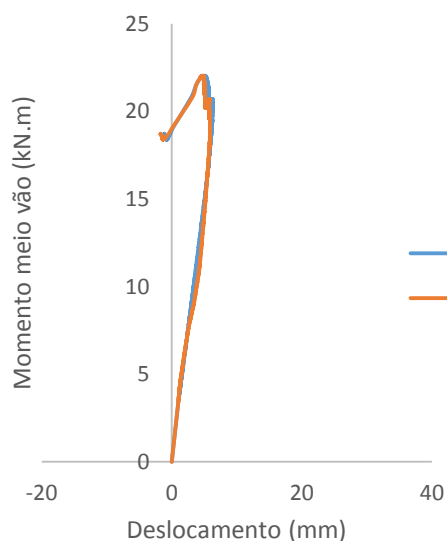


Figura 6.6 - Deslocamentos registados pelos LVDTs P1 e P5

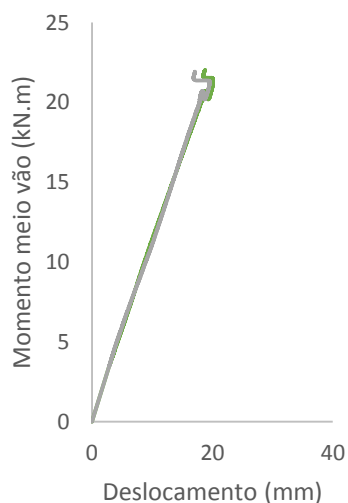


Figura 6.7 - Deslocamentos registados pelos LVDTs P2 e P6

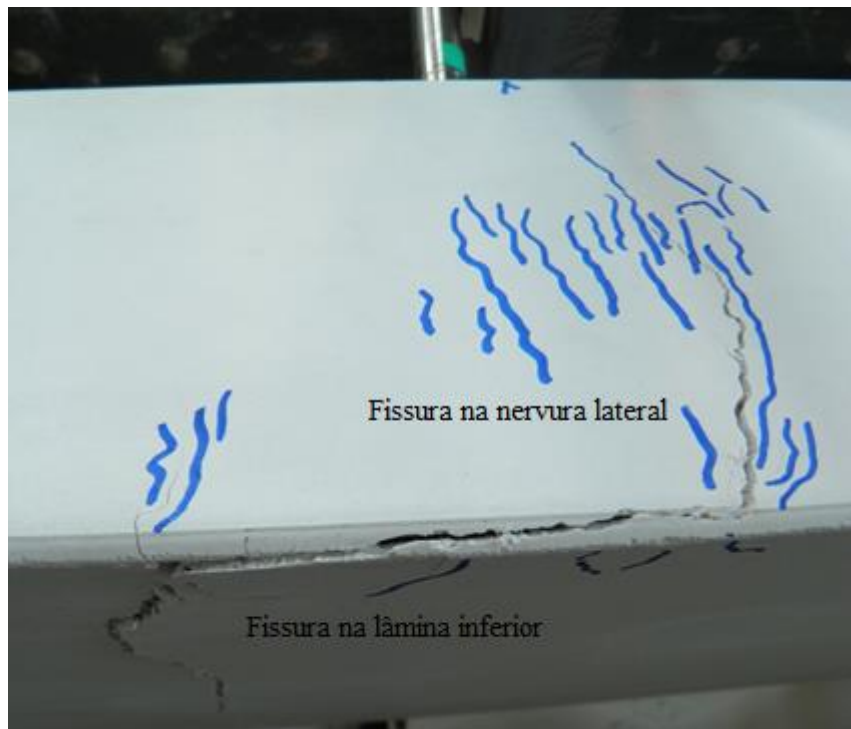


Figura 6.8 - Fissura que determinou a rotura no painel P2

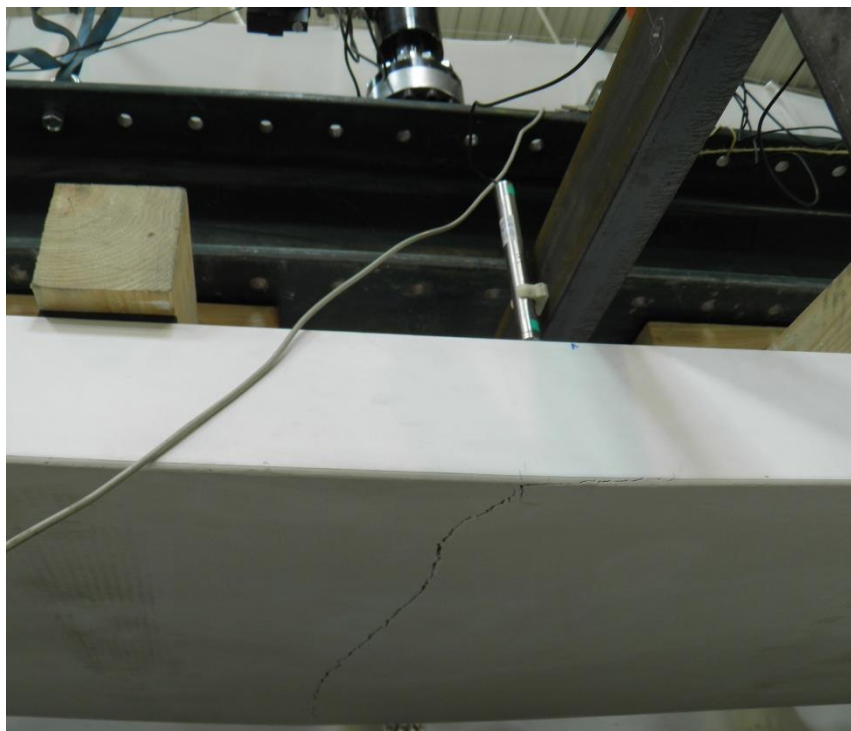


Figura 6.9 – Fenda que determinou a rotura no painel P2

Na Figura 6.8 é mostrada a fenda que determinou a rotura do painel P2. Na Figura 6.9 está representada a mesma fenda, vista a uma maior distância, permitindo ver que esta ocorreu numa secção afastada das linhas de aplicação de carga.

Conforme se observa na Figura 6.8, a fissura crítica propagou-se ao longo da ligação entre a nervura lateral e a lâmina inferior do painel. Isto é, a secção onde se desenvolveu a fissura na nervura lateral é diferente da secção onde se verificou a fenda na lâmina inferior. Após o final do ensaio, separando o painel em duas metades, verificou-se que a espessura da lâmina inferior não era constante ao longo de toda a largura do painel, atingindo um valor mínimo na zona de ligação à nervura lateral. Assim, pode considerar-se que terá sido este o facto que determinou a propagação da fenda observada na Figura 6.8.

Na Figura 6.10 é apresentado o gráfico com os deslocamentos para o painel P3, ensaiado aos 11 dias de idade do GRC.

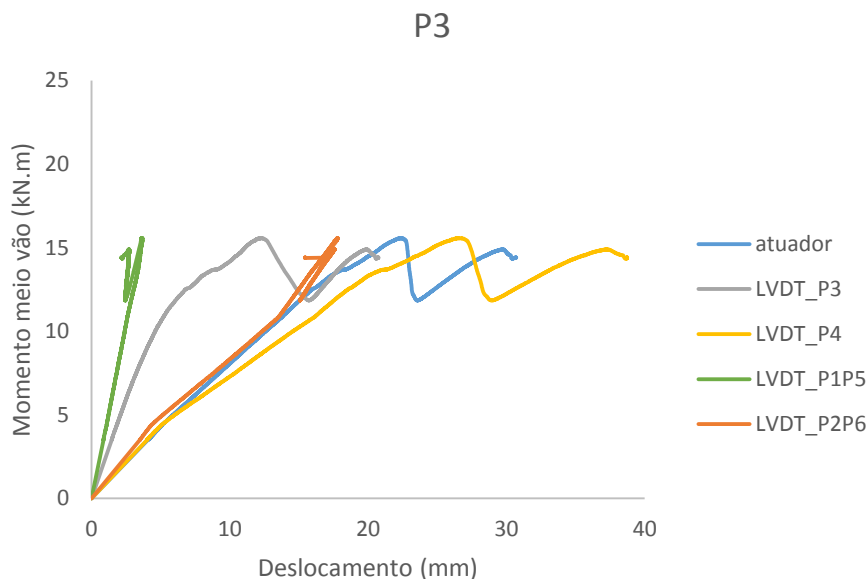


Figura 6.10 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P3

Tal como aconteceu no painel P2, os valores registados para os LVDTs extremos foram praticamente iguais, o que levou ao cálculo dos seus valores médios. Mais uma vez, o LVDT do meio vão, P4, registou o maior deslocamento. O momento máximo na rotura foi de 15,576 kN.m.

Assim como ocorreu para o painel P1, verificou-se que após ser atingida a resistência máxima, o diagrama momento fletor a meio vão – deslocamento exibe um ramo descendente, seguido de novo ramo ascendente, este ultimo resultante do apoio da lâmina de GRC sobre o perfil em forma de losango. O ensaio foi parado quando a fenda na lâmina inferior apresentava um valor de cerca de 4 mm.

A Figura 6.11 apresenta as fendas na nervura lateral do painel P3. A propagação da fenda pode ser observada na Figura 6.12.

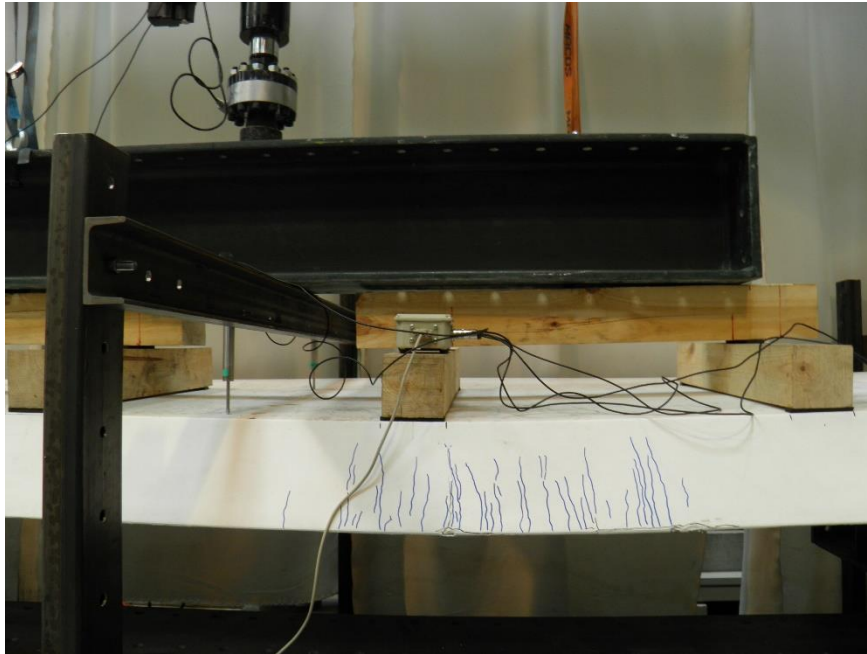


Figura 6.11 – Fendas na nervura lateral do painel P3

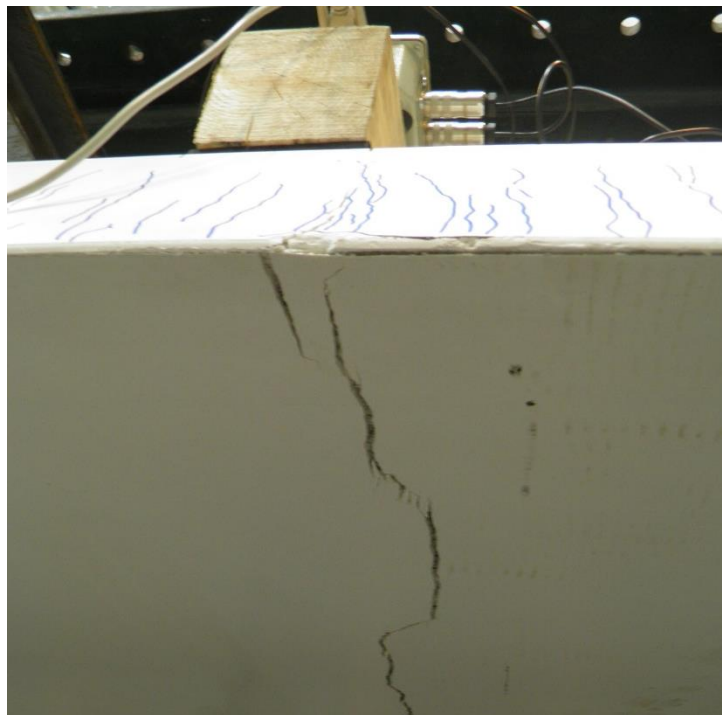


Figura 6.12 – Detalhe da fenda que determinou a rotura na lâmina inferior do painel P3

As fissuras do painel P3 começaram a aparecer próximas do segundo ponto de carga, do lado direito do painel. A fissura desenvolvida para a lâmina inferior praticamente pelo mesmo local onde se iniciou a rotura.

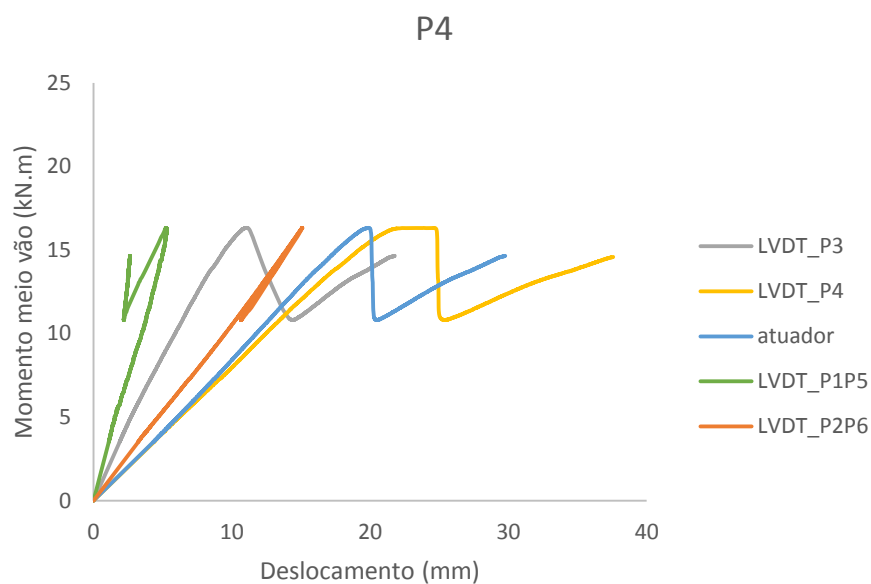


Figura 6.13 - Diagrama momento fletor a meio vão - deslocamento para o painel P4

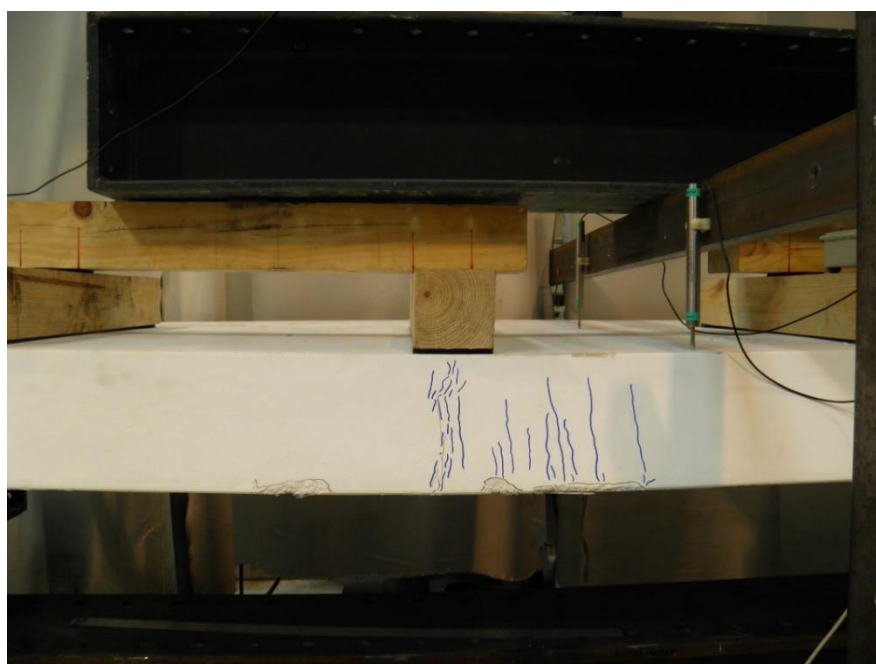


Figura 6.14 – Fendas na nervura lateral do painel P4

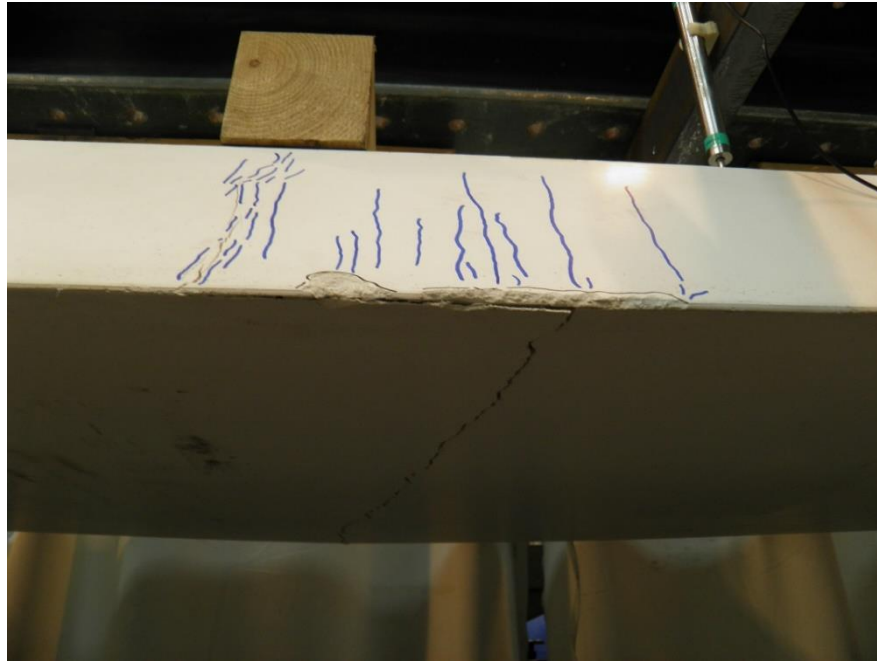


Figura 6.15 – Detalhe da fenda que determinou a rotura na lâmina inferior do painel P4

Por fim, o diagrama momento fletor a meio vão – deslocamento para o painel P4 é apresentado na Figura 6.13. Neste diagrama, à semelhança dos outros, o maior deslocamento foi registado pelo LVDT P4. O momento máximo registado na rotura foi de 16,325 kN.m.

Na Figura 6.14 são apresentadas as fissuras na nervura lateral do painel. A fissura iniciou-se próximo do meio vão e propagou-se ao longo da nervura lateral e a lâmina inferior de GRC. A Figura 6.15 mostra a propagação desta, para o lado oposto. Ao ser propagada, a fissura conduziu ao destacamento da lâmina inferior.

Na Tabela 6.1 são apresentados os valores do momento máximo registado na rotura para os três painéis.

De acordo com os gráficos e tabela, o momento fletor na rotura para estes três ensaios foi superior ao obtido para o ensaio preliminar. Pelos motivos apresentados atrás não se considera nesta análise comparativa os resultados do ensaio preliminar (painel P1).

Relativamente aos três painéis ensaiados com carga aplicada em quatro linhas, o painel com maior resistência foi o P2. Tendo em conta que este painel foi ensaiado aos 67 dias e os painéis P3 e P4 foram ensaiados aos 11 dias de idade do GRC, pode considerar-se o aumento da resistência à tração do GRC ao longo do tempo e a variação dos parâmetros LOP e MOR. Tavares (2014) concluiu, em provetes com composição idêntica, que o LOP aumentava com o tempo, e o MOR diminuía. Esta pode ser a causa para a diferença de resultados. O painel P3 e o painel P4, ensaiados no mesmo dia, atingiram valores na rotura semelhantes.

Através da análise das figuras, onde se pode ver o modo e localização da rotura nos painéis, pode ser observado que, praticamente nos três casos, a fissura começou a formar-se em determinada zona do painel e depois propagou-se na lâmina tracionada, ao longo de outra secção. Tal facto pode ser explicado pela fragilidade da ligação entre a nervura lateral e a lâmina inferior do painel (em *premix*).

Para uma melhor compreensão da importância do momento resistente obtido, foi determinada a carga distribuída que atuando no painel real com maior comprimento conduziria ao momento máximo de rotura registado para cada um dos painéis ensaiados. Na Tabela 6.1 apresentam-se esses valores e ainda

o valor da tensão máxima de tração, considerando a seção transversal do painel sujeita ao momento fletor resistente previamente determinado. Essa tensão é dada pela seguinte expressão (6.1):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{I_x} \times y_{m\acute{a}x} \quad (6.1)$$

Tabela 6.1 - Momento máximo na rotura e tensão máxima de tração para cada painel

	Painel		
	2	3	4
M máx (KN.m)	22,036	15,576	16,325
P máx (kN/m ²)	7,989	5,647	5,919
σ máx (MPa)	8,769	6,198	6,496

A tensão atuante foi calculada de um modo simplificado, determinando-se primeiramente a posição do centro geométrico da secção (localizado a 8,516 cm da lâmina inferior). Embora o eixo principal de menor inércia não seja exatamente horizontal, considerou-se, simplifcadamente, no cálculo da tensão atuante, a inércia em torno do eixo horizontal. Isto porque a redistribuição de tensões que ocorre após o surgimento da fenda na lâmina inferior tenderá a fazer com que a distribuição de tensões nessa lâmina seja sensivelmente uniforme.

6.1.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO GRC

O ensaio de resistência à flexão dos seis provetes retirados da placa 1 foi realizado aos 29 dias de idade do GRC e com um esquema baseado na norma NP EN 1170-5. A Figura 6.16 apresenta a rotura do provete 1B1.

Seguidamente, é apresentado o gráfico tensão-extensão para todos os provetes desta série (Figura 6.17). A Tabela 6.2 apresenta, resumidamente, os dados retirados do gráfico e a Tabela 6.3 mostra os valores médios para os mesmos parâmetros.

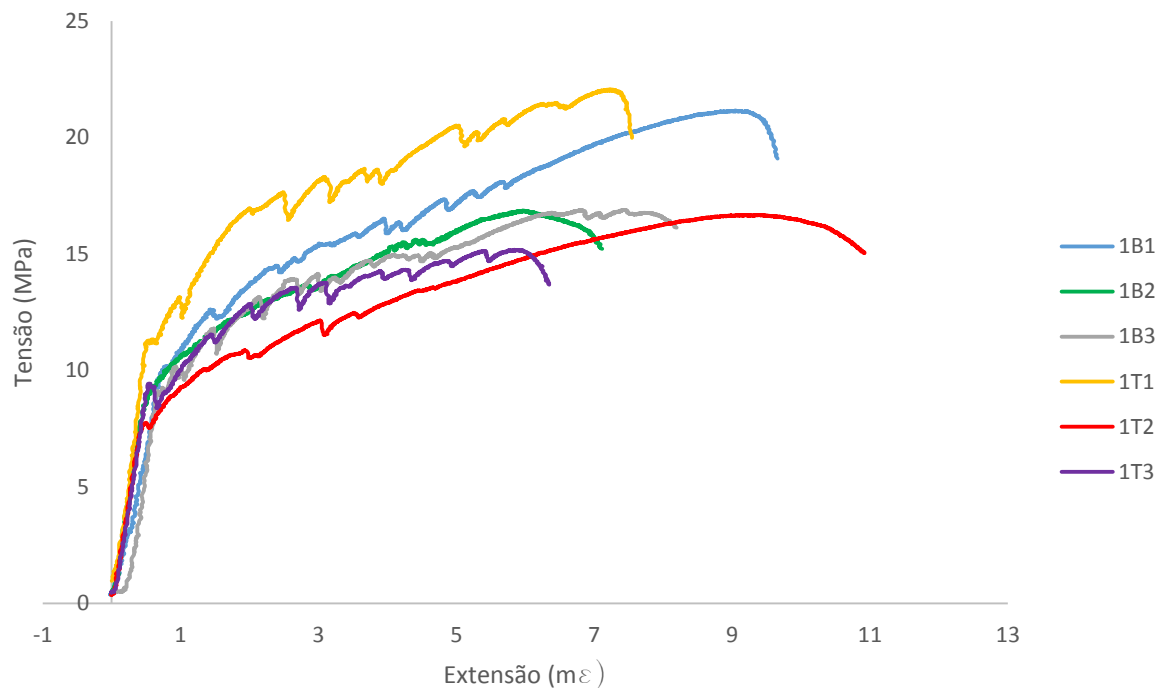


Figura 6.16 - Diagramas tensão - extensão para a primeira campanha experimental de ensaios de flexão do GRC

Tabela 6.2 - Extensão (mε); Tensão (MPa)

Placa 1							
B1				T1			
$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$	$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$
9,060	21,159	0,744	9,925	7,236	22,078	0,552	11,258
B2				T2			
$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$	$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$
5,988	16,865	0,516	8,630	9,372	16,680	0,540	7,592
B3				T3			
$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$	$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$
7,212	16,894	0,504	7,337	5,808	14,821	0,540	8,909

Tabela 6.3 - Média de tensões e extensões

$\varepsilon_{MOR} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{MOR} (MPa)$	$\varepsilon_{LOP} (\mu\varepsilon)$	$\sigma_{LOP} (MPa)$
7,4460	18,083	0,566	8,942

Analisando os dados acima, verifica-se que o provete cuja tensão de ruptura foi maior foi o 1T1. No entanto, no que toca a deformações, o provete 1T2 apresentou o maior valor na ruptura. De um modo geral, é notória uma variabilidade importante nos resultados e não parece existir dependência da orientação (B ou T) ou da face que no ensaio é tracionada. No entanto, deve ser tido em consideração que se trata de uma amostra pouco representativa, devido ao reduzido número de provetes ensaiados.

Tal como foi referido atrás, esta campanha teve como objetivo principal a aplicação da técnica de videogrametria para medição das deformações.

Conforme era expectável para um ensaio de resistência à flexão de GRC, a configuração das curvas demonstra a ductilidade do material, sendo possível notar a fase linear até ser atingida a tensão resistente no limite de proporcionalidade (LOP), seguida por uma fase onde se começam a formar algumas fissuras, até ser atingida a tensão de rotura (MOR).

Pela análise do tratamento dos dados adquiridos pela videogrametria, foram determinados os diagramas momento-curvatura e os diagramas tensão-extensão na zona tracionada para cada provete. Foram realizadas três análises:

- Calculando as deformações para todos os 20 alinhamentos marcados na zona central do provete, com 10 cm de comprimento (Figura 6.17);
- Dividindo a mesma zona em apenas 10 alinhamentos (Figura 6.18);
- Dividindo a mesma zona em apenas 5 alinhamentos (Figura 6.19).

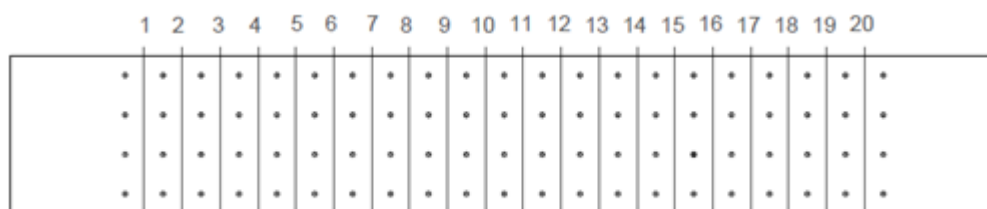


Figura 6.17 - Zona central do provete marcada com 20 alinhamentos

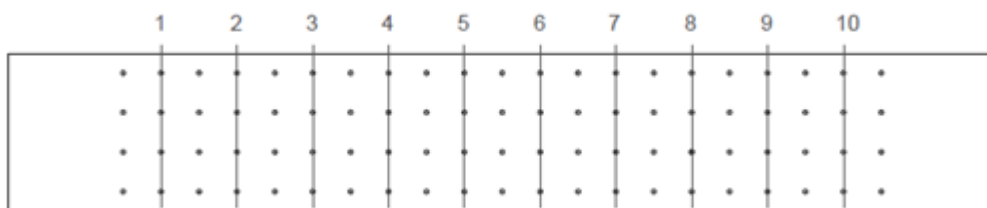


Figura 6.18 - Zona central do provete marcada com 10 alinhamentos

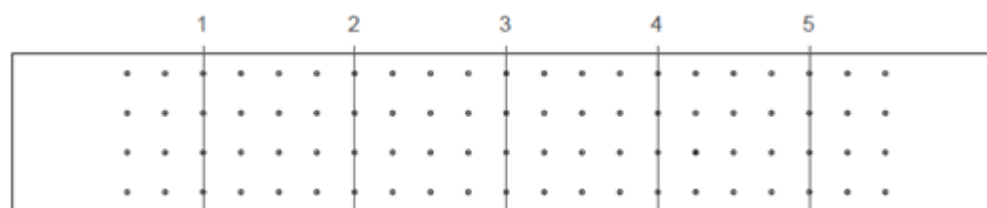


Figura 6.19 - Zona central do provete marcada com 5 alinhamentos

De seguida são apresentados os diagramas tensão-extensão para quatro dos provetes ensaiados. Para a direção B, são apresentados resultados para o provete B1 (Figura 6.20) e o provete B3 (Figura 6.21) e, para a direção T, para o provete T1 (Figura 6.22) e o provete T2 (Figura 6.23). Nos gráficos é representada a análise considerando 10 alinhamentos.

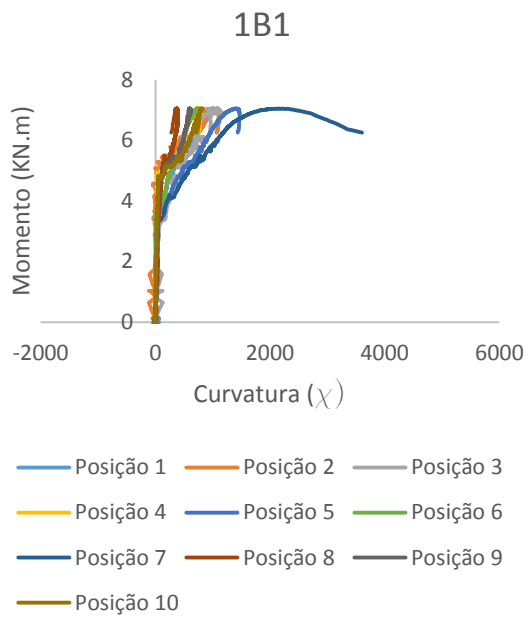


Figura 6.20 – Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1B1 para 10 posições

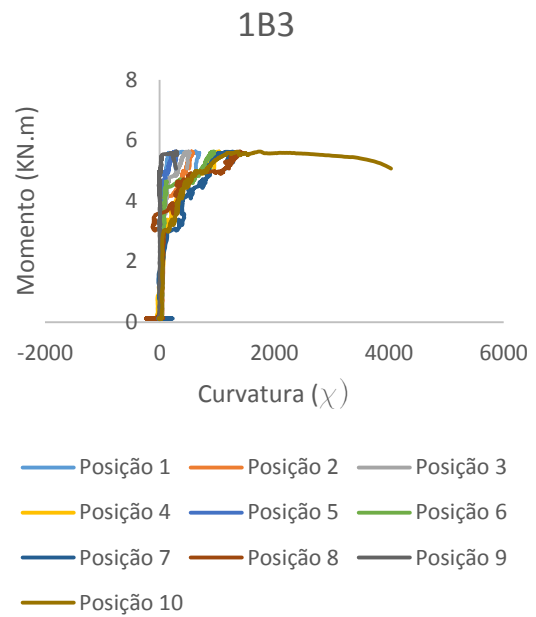


Figura 6.21 – Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1B3 para 10 posições

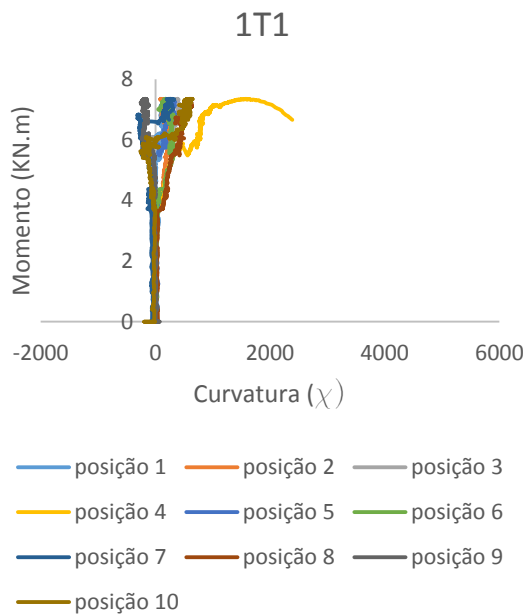


Figura 6.22 - Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1T1 para 10 posições

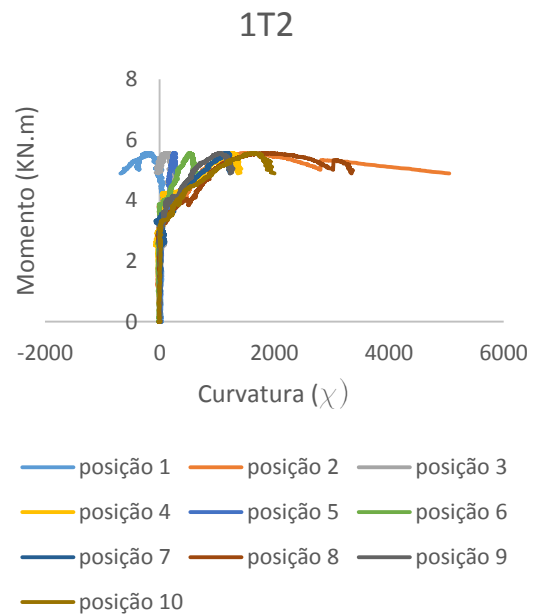


Figura 6.23 - Diagramas momento fletor - curvatura para o provete 1T2 para 10 posições

Atendendo aos gráficos representados, observa-se que o provete com maior momento é o 1T1, igual a 7,359 KN.m, cuja tensão de rotura foi a mais elevada. Como seria de esperar o provete 1T2, com maiores extensões, corresponde ao provete com maior curvatura (Figura 6.23). A maior curvatura ocorre na posição 2, que coincide com a posição da fenda determinante, conforme se pode ver na Figura 6.24.



Figura 6.24 - Rotura do provete 1T2

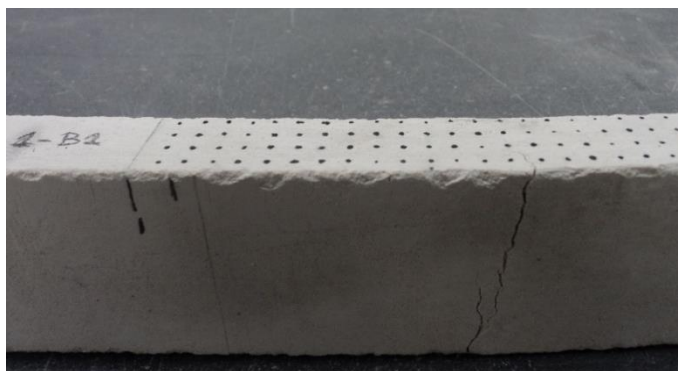


Figura 6.25 – Rotura do provete 1B1

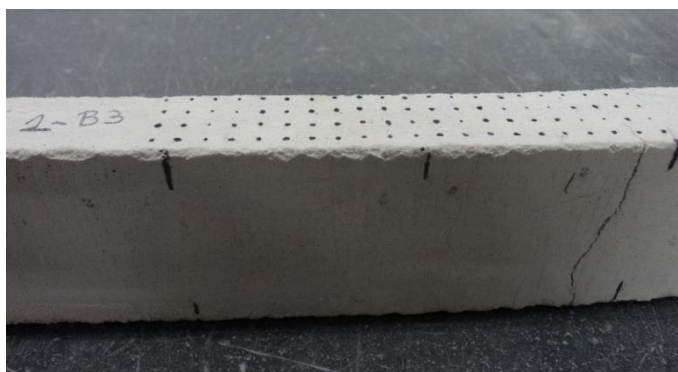


Figura 6.26 - Rotura do provete 1B3

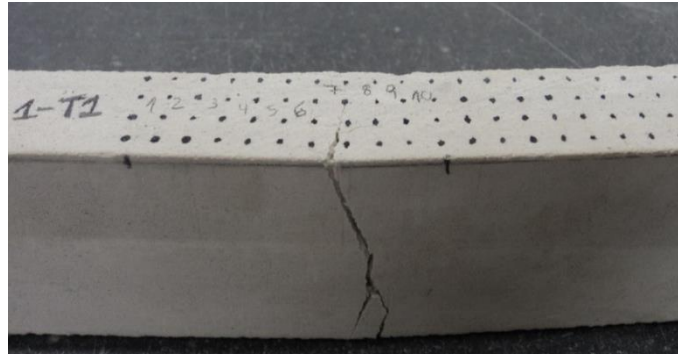


Figura 6.27 - Rotura do provete 1T1

Quanto ao provete 1B1, a maior curvatura surge na posição 7. Como se pode observar na Figura 6.25, concorda com a abertura da fenda onde se verifica a rotura. O mesmo sucede com o provete 1B3 (Figura 6.26) e com o provete 1T1 (Figura 6.27), com maior curvatura na posição 10 e na posição 4, respetivamente.

Na Figura 6.28 é apresentado o diagrama tensão-extensão para o provete 1T2 para as 20 posições. Nas seguintes são expressos os mesmo parâmetros para as 10 (Figura 6.29) e para as 5 posições (Figura 6.30).

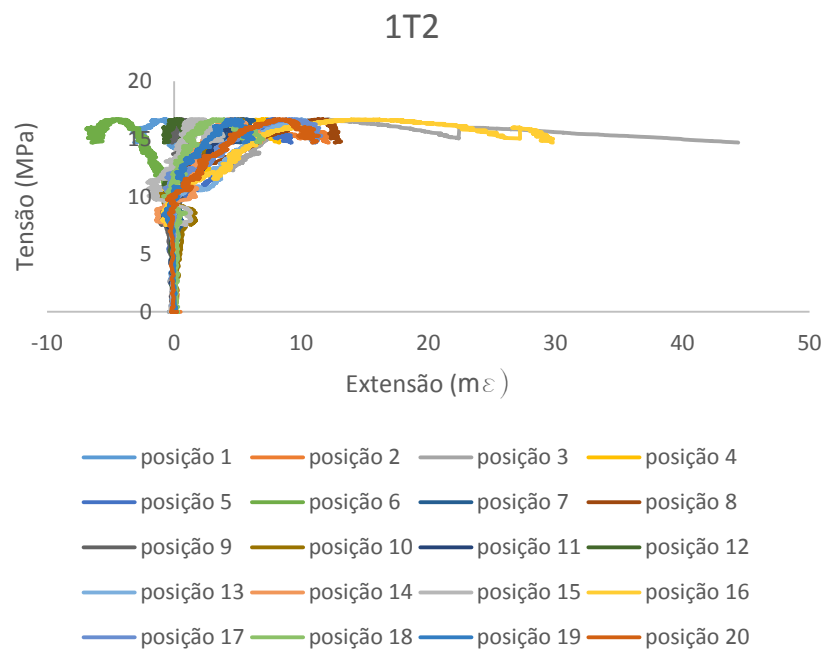


Figura 6.28 - Diagramas tensão - extensão para as 20 posições do provete 1T2

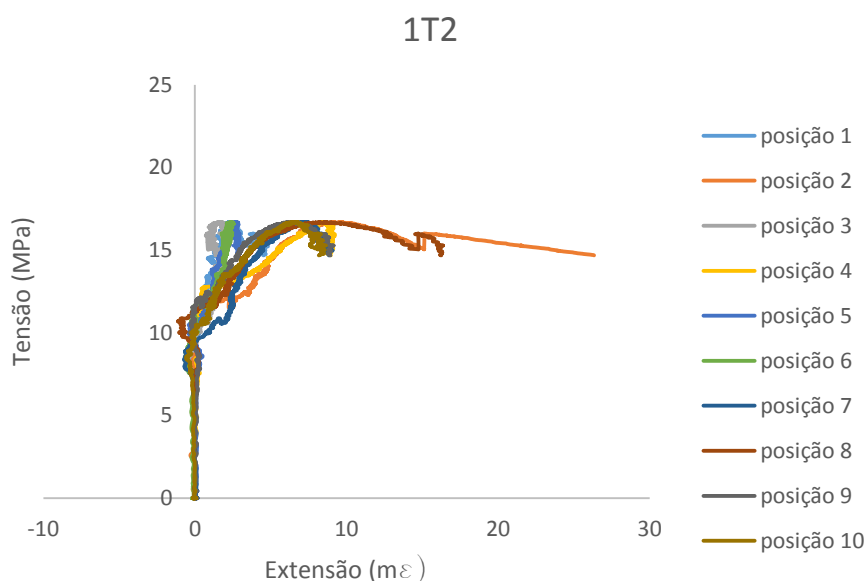


Figura 6.29 - Diagramas tensão - extensão para as 10 posições do provete 1T2

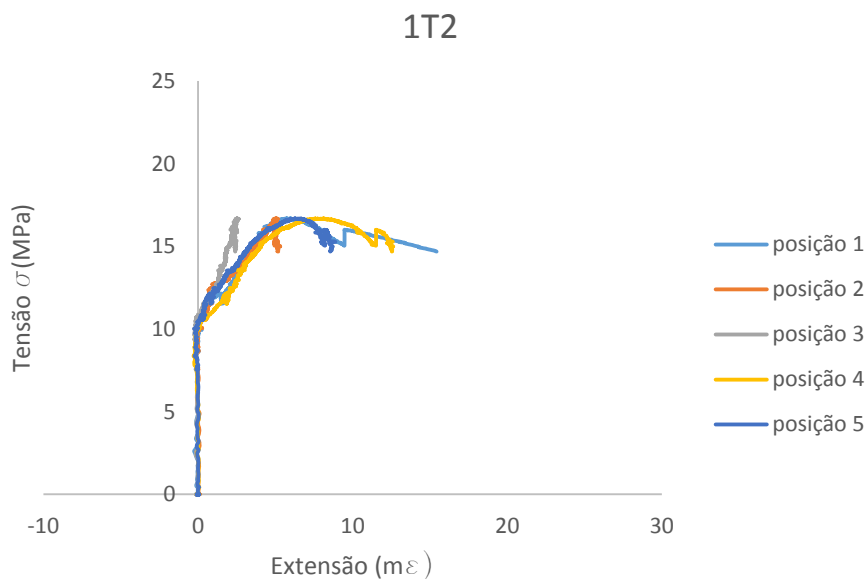


Figura 6.30 - Diagramas tensão - extensão para as 5 posições do provete 1T2

Comparando os gráficos, é possível notar uma certa filtragem, e até coerência, nos resultados à medida que o número de posições vai diminuindo. De facto, tendo em conta que a maior parte das fissuras originadas são de difícil perceção, o diagrama tensão-extensão para as cinco posições exibe uma análise mais clara para as fendas visíveis.

Pela análise do primeiro diagrama, a posição cuja extensão é maior é a posição 3, onde a curvatura é mais acentuada e onde se formou a fenda principal. No diagrama seguinte, para as 10 posições, aquela cuja extensão é maior é na posição 2, que corresponde à média dos resultados na posição 3 e 4 do

primeiro gráfico. Em relação ao último, a maior extensão é apontada na posição 1 que, por sua vez, inclui a média de resultados nas posições 1, 2, 3 e 4.

Deste modo, é exequível a apresentação dos dados de uma das três formas. A primeira, com as 20 posições, é mais rigorosa no sentido em que, analisando as 20 posições, são estudados 83 pontos do provete. No entanto, o erro é maior porque o deslocamento relativo entre pontos é menor e, por isso, é mais difícil lê-lo com rigor. Com a diminuição das posições, é possível realizar uma avaliação com mais clareza em relação ao que é, realmente, visível num provete com estas dimensões e a margem de erro diminui com o maior afastamento dos pontos. Os gráficos para os restantes provetes são apresentados em anexo devido à extensão do estudo. A Figura 6.31 apresenta as fissuras ocorridas no provete 1T2.

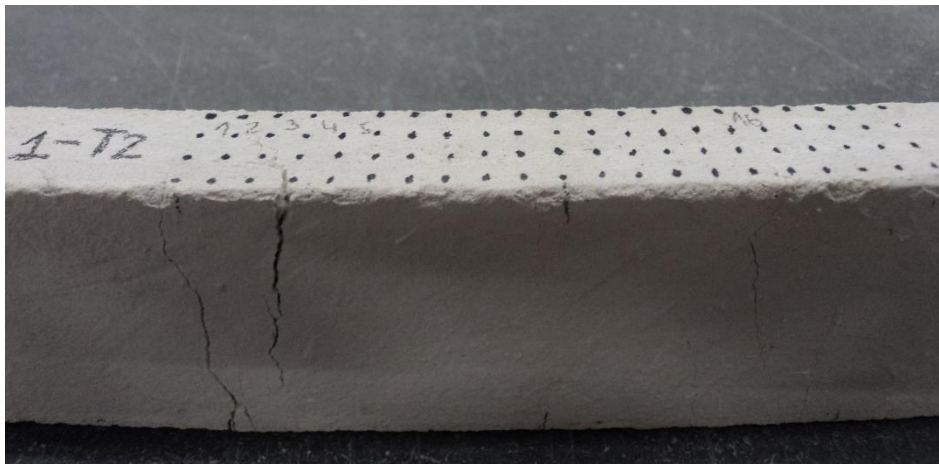


Figura 6.31 - Rotura do provete 1T2

Analisando cada provete e cada fissura, podem ser encontradas mais relações entre as posições com curvaturas mais acentuadas e maiores extensões e a localização dessas fissuras, o que evidencia coerência no método de ensaio e no tratamento de dados posterior.

Seguidamente, é apresentada uma análise relativamente à variação dos valores de extensão em função da posição, tendo em conta os resultados obtidos diretamente do sistema de aquisição, referenciado como “atuador”, e os resultados da videogrametria para um determinado instante de tempo. O instante de tempo analisado foi o momento em que se deu a rotura do provete, isto é, quando a tensão é máxima e equivale à tensão de rotura, σ_{MOR} . As curvas dizem respeito às extensões verificadas nas 20 posições e às resultantes da média para as 10 e para as 5 posições. A acompanhar os gráficos são apresentados esquemas, da vista de lado e da face tracionada, desenhados no programa AutoCad, com a representação das fissuras visíveis nos provetes respetivos.

A Figura 6.32 apresenta as curvas da variação da extensão, em função da posição para o provete B1. A Figura 6.33 representa o esquema das fissuras na face lateral e na face virada para baixo durante o ensaio. Na face tracionada é possível visualizar a propagação das fendas principais. A existência de extensões negativas pode ser explicada pela forma como algumas fissuras se propagam, ou seja, pela mudança de orientação. De um modo geral, é perceptível que a maiores extensões, correspondem fissuras da área tracionada. Comparando as três análises de videogrametria com a extensão obtida naquele instante pelo sistema de aquisição, é possível observar que a extensão calculada com base na progressão do atuador é superior às extensões calculadas com base na videogrametria. Este resultado seria de esperar uma vez que a progressão do atuador inclui a deformação de outros componentes que não o provete de GRC,

nomeadamente a deformação do pórtico metálico de reação e a deformação do próprio atuador. O sistema de videogrametria fornece assim resultados mais realistas para a deformação do próprio GRC.

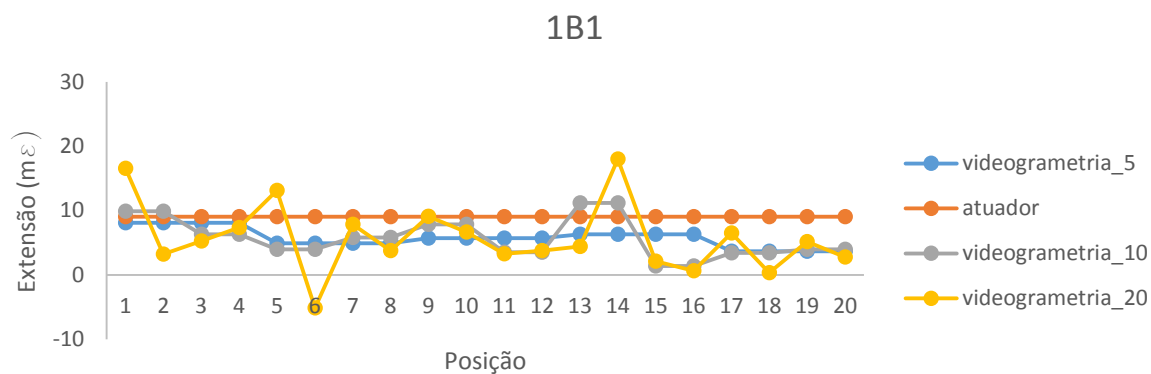


Figura 6.32 - Curvas extensão - posição para o provete 1B1

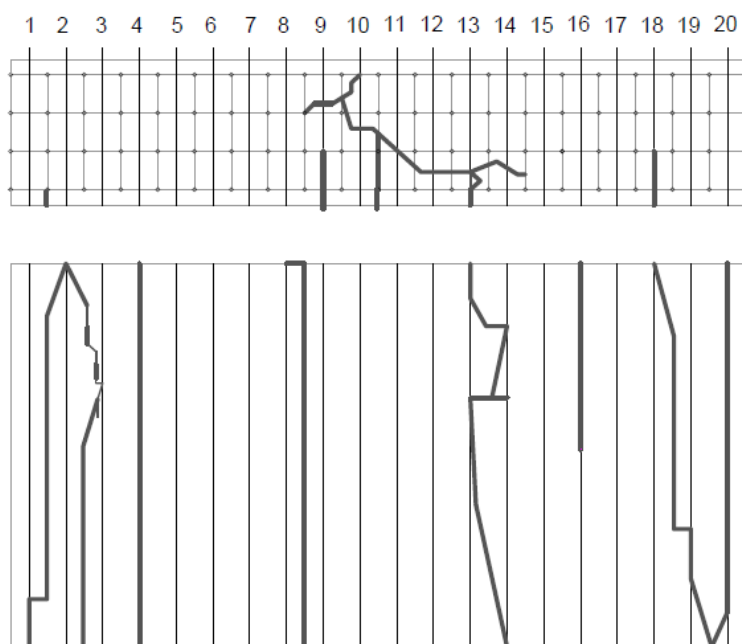


Figura 6.33 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1B1, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)

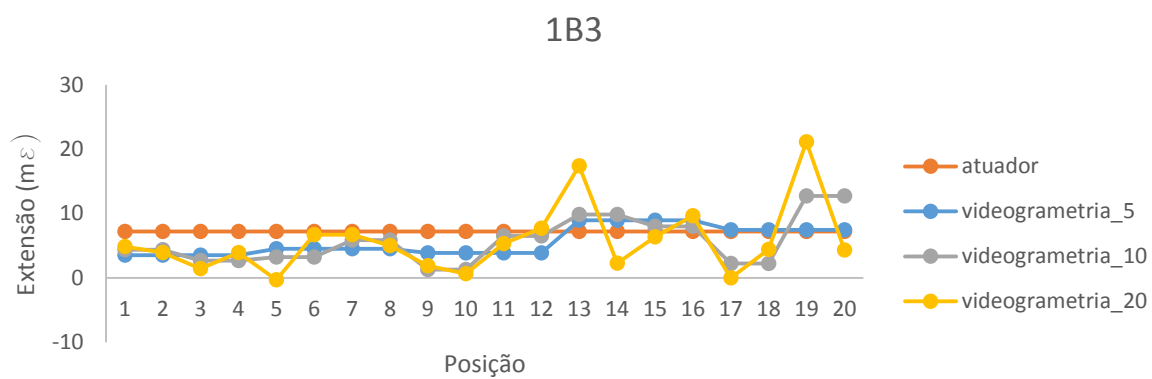


Figura 6.34 - Curvas extensão - posição para o provete 1B3

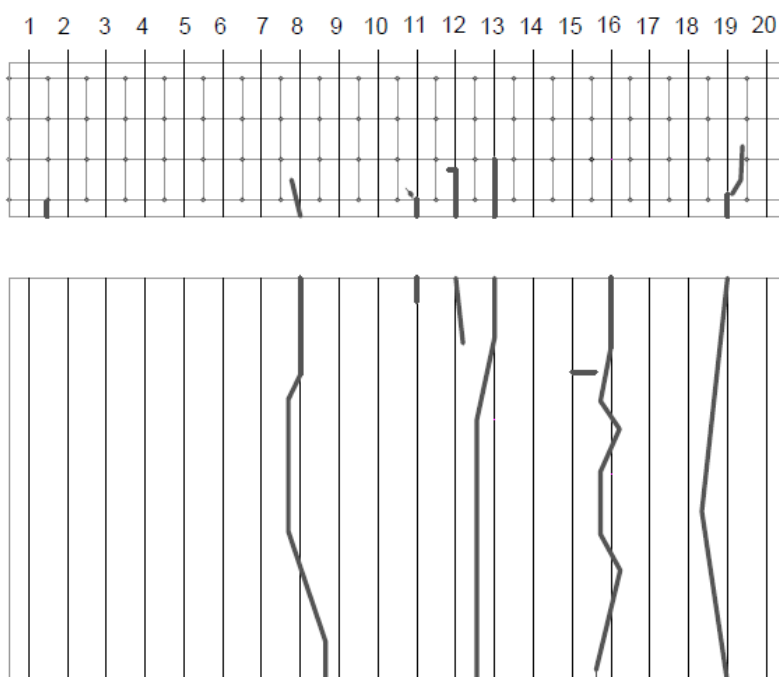


Figura 6.35 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1B3, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)

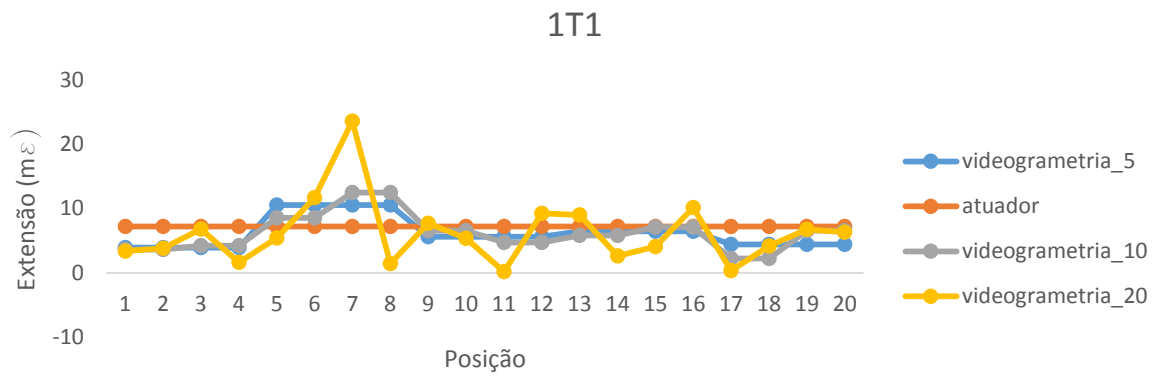


Figura 6.36 - Curvas extensão - posição para o provete 1T1

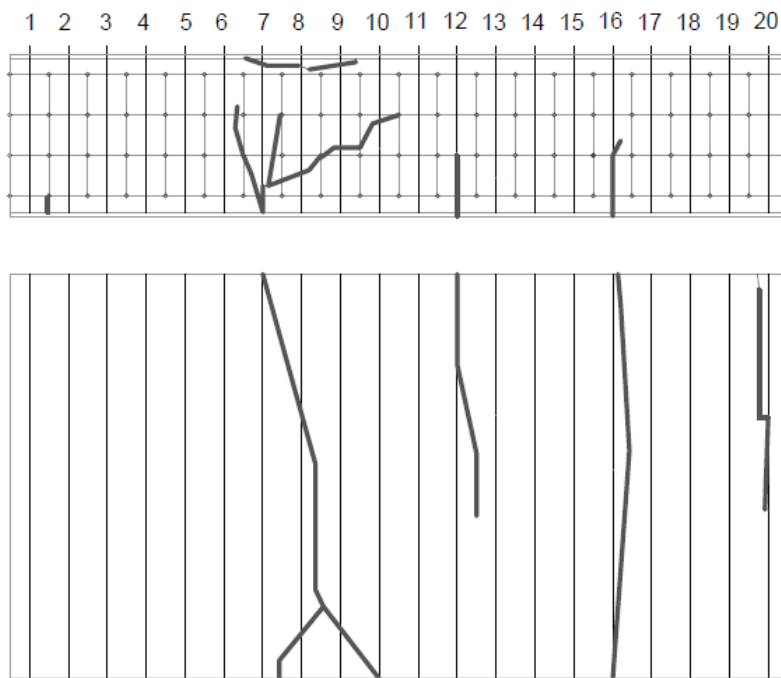


Figura 6.37 - Representação das fissuras ocorridas no provete 1T1, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)

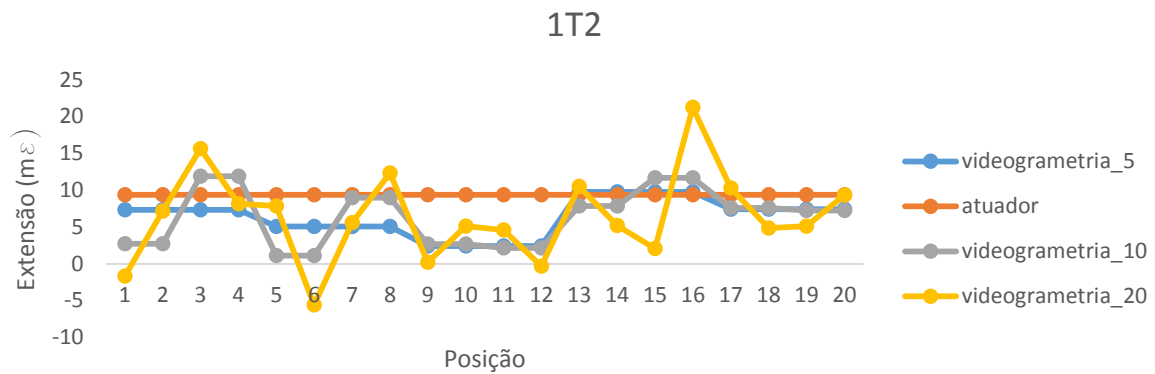


Figura 6.38 - Curvas extensão - posição para o provete 1T2

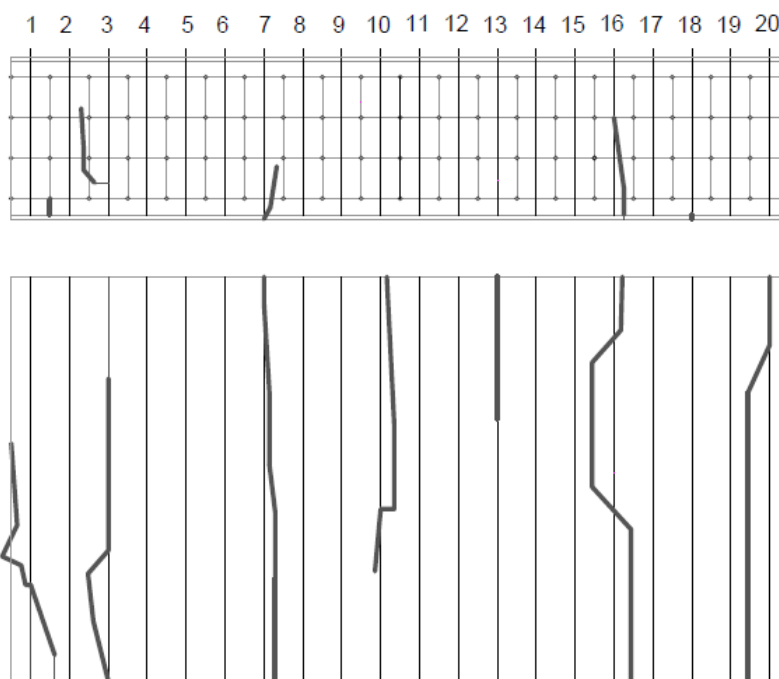


Figura 6.39 - Representação das curvas ocorridas no provete 1T2, na face lateral (em cima) e na face inferior (em baixo)

No gráfico da Figura 6.34, pode-se observar que as curvas estão próximas umas das outras e que as maiores extensões ocorrem na posição 13 e 19. Comparando com a Figura 6.35, duas das fendas principais desenvolvem-se ao longo dessas posições. A presença da fissura na posição 8 também é evidente na extensão verificada.

No gráfico da Figura 6.36, a maior extensão ocorre na posição 7. Analisando, depois, a localização das fissuras no esquema representativo do provete T1 (Figura 6.37), é mais uma vez concordante que a uma das fendas principais, neste caso, a de rotura, se propaga ao longo dessa posição.

A variação das deformações ao longo das posições marcadas no provete T2 são representadas no gráfico da Figura 6.38. Neste, é possível notar uma maior diferença entre a configuração das curvas existentes. As maiores extensões positivas ocorrem na posição 3 e na posição 16, coincidente com duas das fissuras representadas na Figura 6.39.

As curvas para a videogrametria de 5 e de 10 posições são, normalmente, mais concordantes com a curva de extensão geral obtida pelo sistema de aquisição. Na curva das 20 posições, é mais notória a diferença e variação das deformações ao longo do provete.

De uma forma geral, o processo de videogrametria utilizado mostrou resultados concordantes com o que ocorreu nos ensaios dos seis provetes de GRC. Esta análise serviu não só para abordar os resultados numa perspetiva diferente, como também para evidenciar as relações de extensão e curvatura com os mecanismos de rotura.

6.1.4. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS

Após serem estudados os ensaios dos painéis e das placas em GRC, é possível comparar as tensões geradas em cada um dos casos.

Relativamente aos valores calculados para a tensão máxima de tração ($\sigma_{\text{máx}}$) dos painéis (Tabela 6.1), verifica-se que são significativamente inferiores aos valores obtidos para a tensão limite de proporcionalidade (LOP) e para a tensão de rotura (MOR) nos ensaios de flexão das lâminas de GRC. É importante considerar que, nestes painéis, a tensão de tração instalada na lâmina inferior será sensivelmente uniforme, não havendo assim os elevados gradientes de extensão que se verificam nos ensaios de flexão dos provetes de GRC.

Assim, para descrever o comportamento dos painéis em estudo, seriam mais representativos os ensaios de tração direta do que os ensaios de flexão baseados na norma NP EN 1170-5. Conforme foi verificado no capítulo 3, os ensaios de tração resultam em tensões resistentes inferiores às obtidas em ensaios de flexão.

O comportamento resistente do GRC é correntemente caracterizado recorrendo ao ensaio de flexão previsto na norma NP EN 1170-5, atendendo à complexidade associada à realização de um ensaio de tração direta com rigor. É assim importante salientar que os resultados dos ensaios de flexão de GRC não podem ser diretamente aplicados na análise de elementos onde as extensões na zona mais tracionada são sensivelmente uniformes, como é o caso dos painéis em estudo. Daí a importância dos ensaios dos painéis realizados nesta dissertação, que reproduzem com uma aproximação razoável o comportamento dos painéis reais sob a ação de pressões laterais.

Por fim, é importante destacar que a rotura dos painéis foi sempre condicionada pela sua zona central e nunca pela ligação à estrutura metálica. Contudo, verificou-se sistematicamente o aparecimento de fendas horizontais na ligação entre a lâmina inferior e a nervura vertical no topo do painel (Figura 6.40).

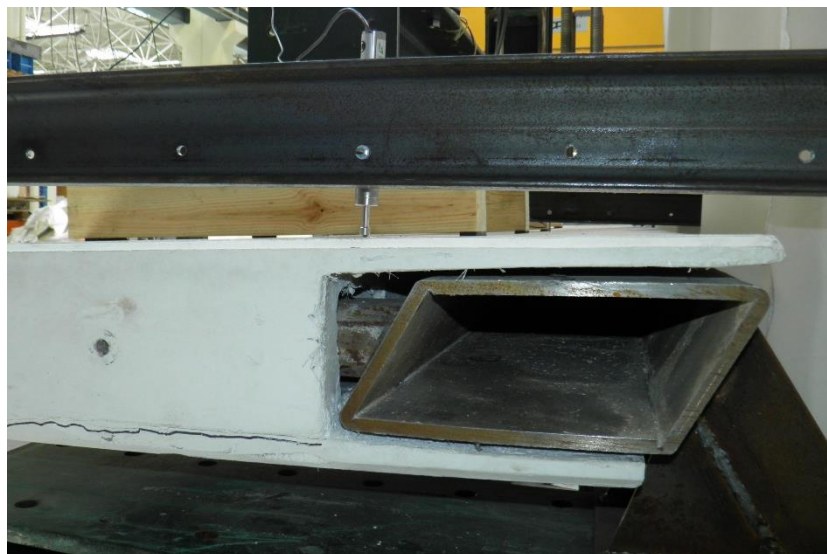


Figura 6.40 – Fendas horizontais entre a lâmina inferior e a nervura vertical

6.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO CÍCLICO

Os ensaios cíclicos foram realizados nas placas 2 e 3. Para a primeira, o critério de paragem por deslocamento no ensaio monotónico foi considerado de 4 mm. Para a placa 3, foi considerado igual a 3 mm, conforme foi explicado no capítulo 5. Uma vez que a paragem da parte monotónica é feita manualmente, os valores da força correspondentes ao deslocamento são aproximados dos valores reais correspondentes ao deslocamento limite (δ_{limite}).

Nas tabelas, F_{sup} representa a força máxima obtida no ensaio monotónico precedente ao ensaio cíclico. A amplitude é calculada com base nesse valor e num valor mínimo, considerado como 20% da força máxima.

A Tabela 6.4 apresenta os parâmetros de ensaio para a placa 2 e a Tabela 6.5 apresenta os mesmos para a placa 3.

Tabela 6.4 - Parâmetros do ensaio cíclico da placa 2

Placa 2 (ensaio aos 57 dias)							δ_{limite} (mm)
	2B1	2B2	2B3	2T1	2T2	2T3	
F_{sup} (KN)	1,12	0,82	0,85	1,14	0,96	1,05	
$F_{\text{inf}} = 0,2 * F_{\text{sup}}$ (KN)	0,22	0,16	0,17	0,23	0,19	0,21	
Amplitude = $\Delta F / 2$	0,45	0,33	0,34	0,46	0,38	0,42	
Face moldada	baixo	cima	baixo	baixo	cima	baixo	4

Tabela 6.5 – Parâmetros do ensaio cíclico da placa 3

Placa 3 (ensaio aos 64 dias)							δ_{limite} (mm) 3
F_{sup} (KN)	0,78	0,74	1,06	0,83	0,75	0,79	
$F_{\text{inf}} = 0,2 * F_{\text{sup}}$ (KN)	0,16	0,15	0,21	0,17	0,15	0,16	
Amplitude = $\Delta F / 2$	0,31	0,30	0,42	0,33	0,30	0,32	
Face moldada	baixo	cima	baixo	baixo	cima	baixo	

6.2.1. CAMPANHA EXPERIMENTAL DA PLACA 2

A Figura 6.41 mostra a rotura dos seis provetes. Apesar de marcados, não foi utilizada a videogrametria para estes ensaios.



Figura 6.41 – Série de provetes da placa 2 após a rotura no ensaio cíclico

No gráfico da Figura 6.42 são apresentados os diagramas obtidos para a extensão máxima em cada ciclo (ε) em função do número de ciclos atingidos (N) para esta campanha. Os valores da extensão máxima e mínima foram determinados tendo em conta os valores da força máxima e mínima registados em cada ciclo aplicado.

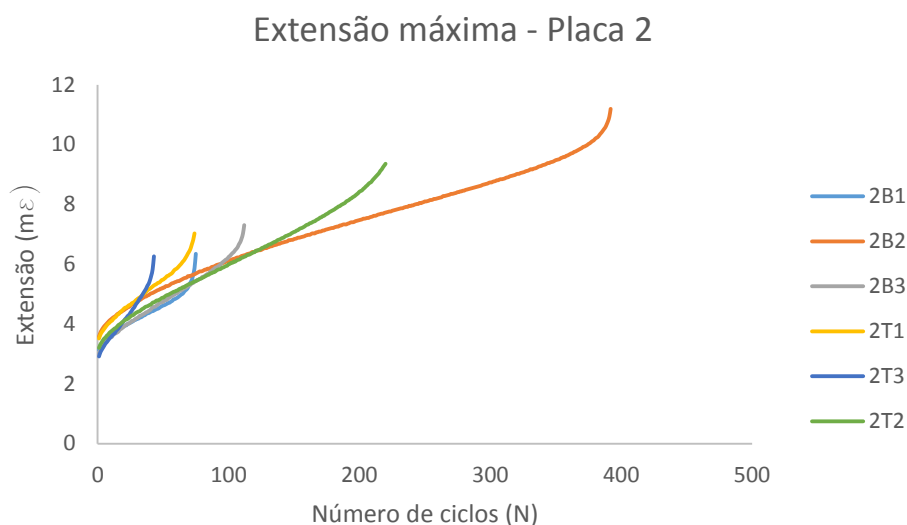


Figura 6.42 - Curvas extensão máxima - número de ciclos dos provetes da placa 2

A extensão máxima ocorreu para o provete B2, com 11,196 m ϵ e 392 ciclos. Comparando todos os provetes, é possível verificar que o provete B2 e o provete T2 atingiram um número de ciclos e extensões notavelmente maiores do que os restantes. O provete T2 atingiu 220 ciclos e uma extensão máxima de 9,36 m ϵ . Em relação aos restantes, a média das extensões máximas verificadas é de 6,738 m ϵ e o número médio de ciclos é de 76. Na Tabela 6.6 apresentam-se resumidamente as extensões máximas atingidas e o número médio de ciclos para esta série.

Tabela 6.6 - Extensões máximas e número médio de ciclos para cada provete da placa 2

	2B2	2T2	2B1	2B3	2T1	2T3
$\epsilon_{\text{máx}}$ (m ϵ)	11,196	9,360	6,348	7,308	7,032	6,264
Média ϵ	10,278		6,738			
N	392	220	75	112	74	43
Média N	306		76			

O provete B2 e T2 foram os únicos que foram ensaiados com a face moldada voltada para cima pelo que a diferença nos resultados pode ser devida a esse fator. O facto do lado liso apresentar uma menor resistência à tração pode ser justificada pela eventual acumulação de partículas finas junto à face do molde ou pela dificuldade das fibras em preencher espaços devido à existência da parede do molde, diminuindo, assim, a resistência à tração nessa zona. Por outro lado, a resistência à compressão do lado rugoso pode ser inferior à da face moldada devido à menor compacidade do compósito em consequência da maior concentração de fibras nessa zona. Relativamente às duas direções, T e B, não é evidenciada nenhuma diferença influenciada pela orientação das fibras pelo que se pressupõe que deve ser aproximadamente uniforme.

Pela configuração das curvas, é de notar que estas seguem o trajeto habitual para ensaio de fadiga. Neste caso, a partir do momento que a rotura por fadiga está próxima, a curva da extensão máxima começa a progredir de forma mais rápida. A inclinação da curva extensão – número de ciclos é assim um indicador da proximidade da rotura por fadiga.

A forma do diagrama para as extensões mínimas em cada ciclo é semelhante ao diagrama apresentado na Figura 6.42.

6.2.2. CAMPANHA EXPERIMENTAL DA PLACA 3

As Figuras 6.43 e 6.44 mostram a rotura dos provetes da placa 3, após o ensaio cíclico. Nos gráficos seguintes são apresentadas as curvas da extensão máxima (Figura 6.45) em função do número de ciclos, para esta série.



Figura 6.43 - Série de provetes da placa 3 após rotura no ensaio cíclico



Figura 6.44 - Rotura do provete 3B1 da placa 3

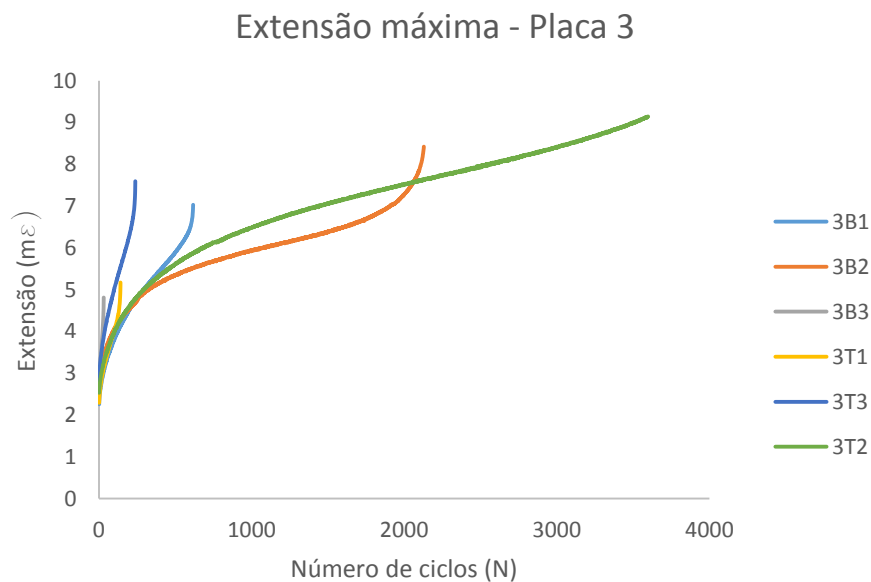


Figura 6.45 - Curvas extensão máxima - número de ciclos dos provetes da placa 3

Para esta série experimental, o provete cujas extensões máximas e mínimas foram maiores foi o provete T2, com valores máximos de extensão máxima e mínima igual a 9,144 mε e a 6,816 mε,

respetivamente. O número de ciclos atingidos foi de 3599. À semelhança do que foi verificado para a primeira campanha, o provete cujas extensões foram também consideravelmente mais elevadas que a restante série, foi o provete 3B2, com valores máximos de 8,424 m ϵ , para a extensão máxima, e 6,012 m ϵ , para a curva da extensão mínima. Mais uma vez, os dois provetes ensaiados com a face moldada para cima atingiram um número maior de ciclos de carga que os restantes, que foram ensaiados com a face moldada virada para baixo. A Tabela 6.7 mostra, resumidamente, os dados dos diagramas da Figura 6.45.

Tabela 6.7 - Dados dos diagramas extensão máxima/número de ciclos

	3B2	3T2	3B1	3B3	3T1	3T3
$\epsilon_{\text{máx}}$ (m ϵ)	8,424	9,144	7,032	4,812	5,172	7,596
Média ϵ	8,784		6,153			
N	2129	3599	617	31	141	238
Média N	2864		257			

6.2.3. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

Em ambas as séries, os provetes mais resistentes foram aqueles cujo ensaio decorreu com a face moldada para cima, ou seja, com o lado rugoso tracionado.

Comparando os resultados das duas campanhas experimentais, da placa 2 e da placa 3, é possível verificar que para a segunda campanha foi atingido um número de ciclos consideravelmente mais elevado. Uma vez que o deslocamento limite para o qual se parou o primeiro carregamento foi mais baixo, 3 mm, os provetes demoraram mais tempo a atingir a rotura no ensaio cíclico.

Foi também verificado que para maiores valores de F_{sup} aplicados, correspondem menores números de ciclos, N, até à rotura. Uma vez que F_{inf} é praticamente igual nos diferentes provetes e as idades de ensaio semelhantes, poder-se-á também elaborar um diagrama de Wöhler, com a força inferior F_{inf} = constante, relacionando a variável F_{sup} e N, que conduzem à rotura por fadiga (Figura 6.46).

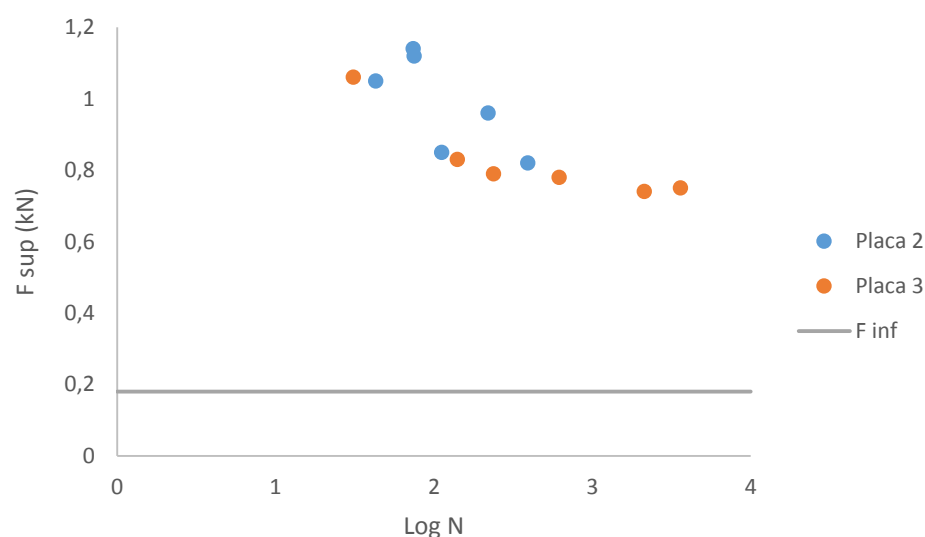


Figura 6.46 - Diagrama de Wöhler para os provetes da placa 2 e da placa 3

Para completar a análise dos resultados cíclicos, determinaram-se os dois níveis de tensão, S , a partir dos resultados do ensaio monotónico da placa 1.

Para a campanha experimental realizada para a placa 1 foi calculado o valor médio de tensão correspondente ao deslocamento, δ , de 3 e 4 mm, para cada um dos provetes. Por fim, cada nível de tensão foi calculado dividindo a tensão referida na frase anterior pela tensão de rotura, σ_{MOR} (6.2):

$$S_{\delta} = \frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_{MOR}} \quad (6.2)$$

Na Tabela 6.8, são apresentados os níveis de tensão calculados para a série experimental da placa 1, com δ_{limite} igual a 4 mm e com δ_{limite} igual a 3 mm.

Tabela 6.8 - Níveis de tensão S para os provetes da placa 1

Proвете	S_{4mm}	S_{3mm}	
1B1	0,82	0,74	Face moldada para baixo
1B3	0,89	0,86	
1T1	0,91	0,84	
1T3	0,97	0,94	
1B2	0,93	0,87	Face moldada para cima
1T2	0,82	0,74	
Média	0,89	0,83	

Considera-se então que o carregamento cíclico em que a tensão máxima é aplicada é o valor obtido num carregamento monotónico quando o deslocamento atinge 4 mm, é caracterizado por um nível de tensão S_{4mm} é igual a 0,89. Quando esse deslocamento é 3 mm, tem-se que S_{3mm} é igual a 0,83.

O gráfico da Figura 6.47 apresenta o número de ciclos até à rotura, para cada um dos provetes ensaiados. No mesmo gráfico, é representada uma curva S-N, retirada da bibliografia e já analisada no segundo capítulo deste trabalho, de uma amostra de betão com fibras de vidro alcalino-resistentes (HD 080326).

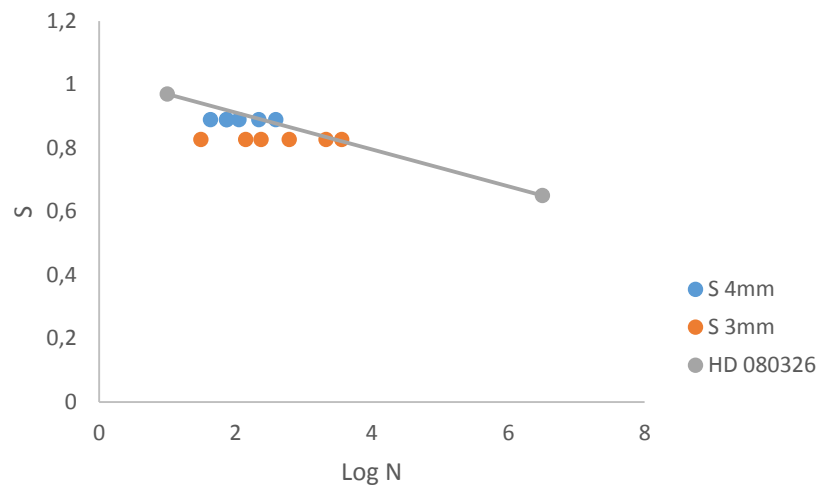


Figura 6.47 – Curva S-N da amostra HD 080326 e níveis de tensão/número de ciclos para as duas séries experimentais

Atendendo à configuração das curvas nos gráficos das extensões já apresentados, é possível observar determinados pontos característicos onde a inclinação modifica. Próximo da fase de rotura do provete, existe uma fase de transição do troço aproximadamente linear para um troço com inclinação ascendente e mais acentuada até atingir, por fim, a extensão máxima na rotura. A esse ponto característico de transição vai ser denominado ε_c e, de um modo geral, pode ser encarado como um “aviso” prévio da rotura, isto é, da extensão máxima, $\varepsilon_{máx}$. Neste sentido, são comparadas as extensões obtidas nos ensaios monotónicos dos provetes da primeira campanha (gráfico tensão-extensão) com as extensões obtidas na segunda campanha (placa 2 e placa 3).

A Tabela 6.9 apresenta os valores aproximados das extensões ε_c , para a placa 2 e para a placa 3.

Tabela 6.9 - Extensão ε_c para cada nível de tensão S

S	Provete		$\varepsilon_c (m\varepsilon)$
S 4mm	2B1		5,076
	2B3		6,672
	2T1		6,360
	2T3		5,628
	2B2		10,020
	2T2		8,952
S 3mm	3B1		6,492
	3B3		4,572
	3T1		4,680
	3T3		6,912
	3B2		7,284
	3T2		8,736

No gráfico da Figura 6.48 estão representados os diagramas tensão-extensão da placa 1 e duas séries de pontos que representam as extensões verificadas na fase de transição, ε_c , para a placa 2, com o nível de tensão correspondente ao deslocamento limite de 4 mm.

Na Figura 6.49 estão representadas os mesmos diagramas tensão-extensão, da primeira campanha, e duas séries de extensões, ε_c , para a placa 3, com o nível de tensão correspondente ao deslocamento de 3 mm.

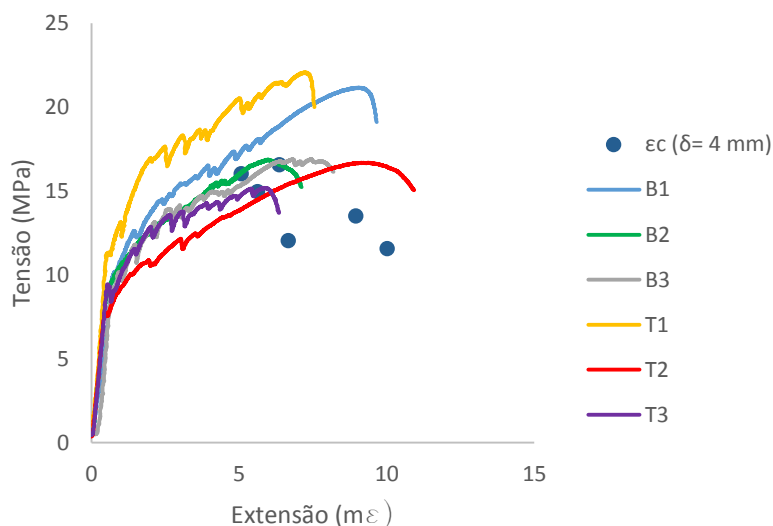


Figura 6.48 – Diagramas tensão/extensão da placa 1 e extensões características da placa 2

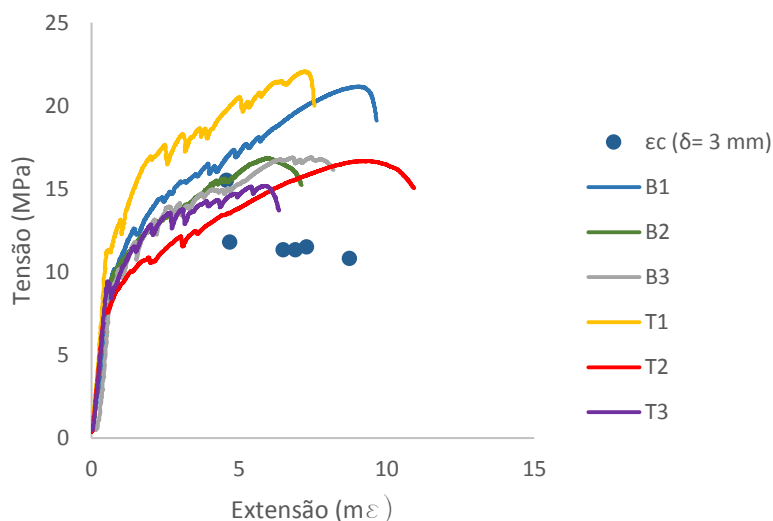


Figura 6.49 - Diagramas tensão/extensão da placa 1 e extensões características da placa 3

Em ambos os gráficos, não foram considerados valores de tensão para as duas séries de extensões.

Observando o gráfico que contém as extensões da placa 2 (Figura 6.48), pode ser notada a diferença entre os valores representativos dos dois provetes ensaiados com a face lisa para cima e dos restantes com a face lisa para baixo. No gráfico da Figura 6.49, essa diferença, apesar de existir, não é tão notória. Relativamente aos dois tipos de extensões representados, próxima da rotura e máxima na rotura, é

possível comparar a sua proximidade em relação às extensões do ensaio monotónico. De facto, as extensões ε_c aparecem um pouco antes das fases de rotura.

De acordo com o que já foi referido no capítulo 3, Ferreira (2001) avaliou o comportamento cíclico em tração e em compressão de provetes de GRC. Através da realização de ensaios laboratoriais, comparou os resultados cíclicos com os diagramas correspondentes aos ensaios monotónicos, em tração e em compressão, de provetes análogos. Seguidamente, são apresentados os diagramas baseados na mesma análise para estas séries experimentais.

Na Figura 6.50 apresentam-se as curvas tensão-extensão dos provetes da placa 1, ensaiados monotonicamente à flexão. Entre as várias curvas, é representada a curva correspondente aos valores médios registados, ou seja, com a teno limite de proporcionalidade média (LOP) e a tensão média de rotura (MOR).

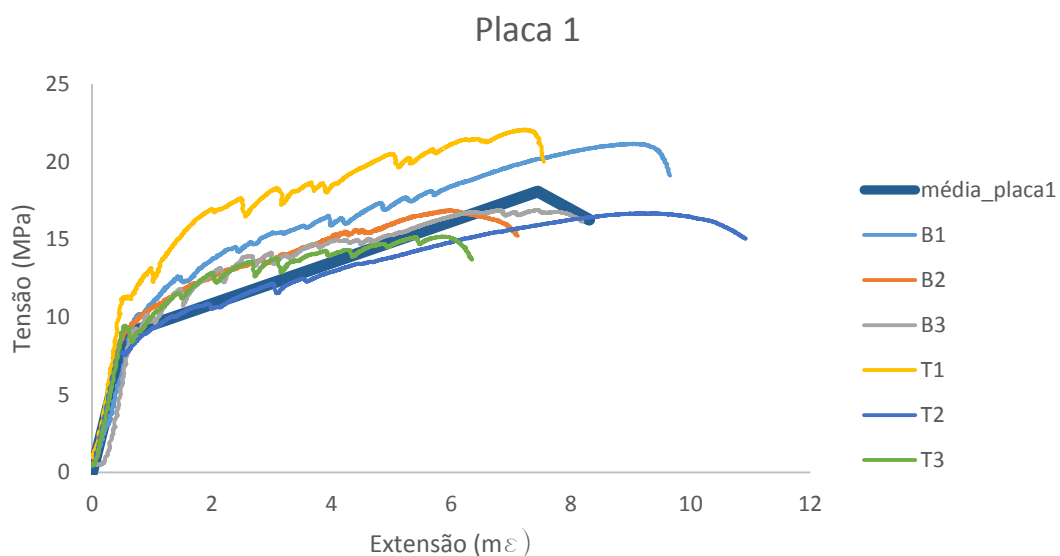


Figura 6.50 – Diagramas tensão/extensão da placa 1 e curva média dos resultados

Pela análise do gráfico da Figura 6.50, pode ser verificada a dispersão existente nos resultados. As tensões e extensões ocorridas dependem, de um modo geral, de cada provete.

Na Figura 6.51 apresentam-se os resultados dos ensaios cíclicos da placa 2, com deslocamento limite de 4 mm. No mesmo gráfico, apresenta-se, para comparação, o diagrama correspondente à média dos resultados do ensaio monotónico de flexão nos provetes análogos da placa 1.

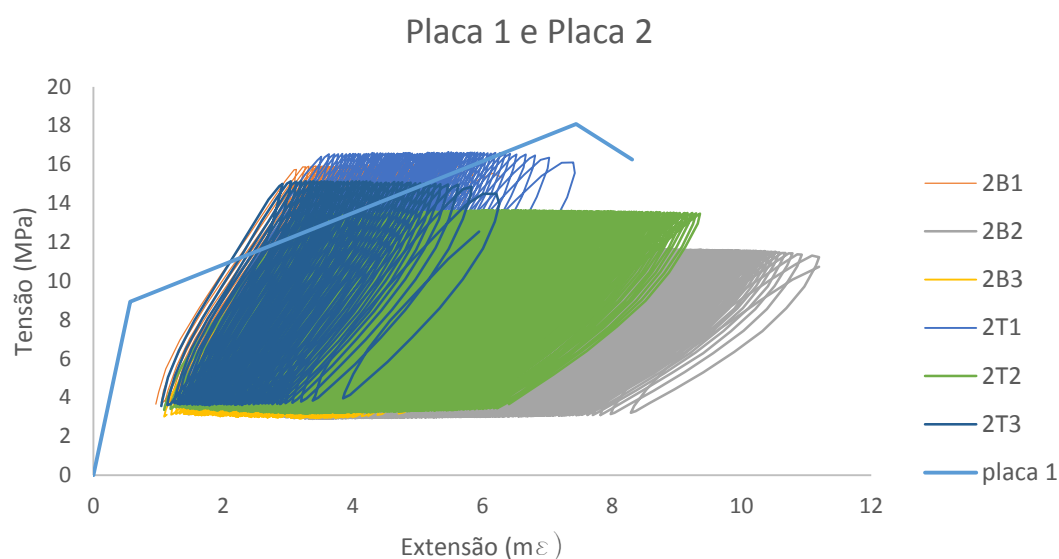


Figura 6.51 – Envolvente de flexão nos ensaios cíclicos da placa 2

Na Figura 6.52 apresentam-se os resultados cíclicos da placa 3, com deslocamento limite de 3 mm. No mesmo gráfico, é apresentada novamente a mesma curva média dos resultados monotônicos da placa 1.

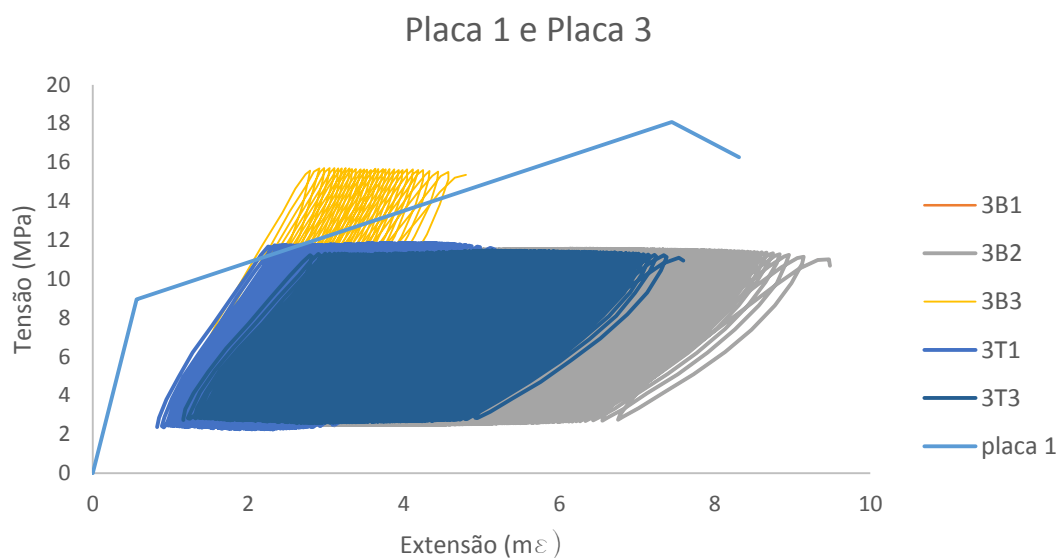


Figura 6.52 – Envolvente de flexão nos ensaios cíclicos da placa 3

Da análise dos gráficos, é possível observar que os diagramas dos ensaios monotônicos apresentam-se, sensivelmente, como envelope dos diagramas cíclicos. Comparando os dois gráficos, os resultados da placa 3 são menos dispersos, à exceção do provete 3B3, e a concordância é maior.

Por outro lado, as extensões máximas verificadas nos ensaios cíclicos são bastante próximas das ocorridas para a tensão média de rotura (MOR) da placa 1. De um modo geral, exceto os provetes T2 e B2 das duas placas, as extensões máximas atingidas são inferiores às sucedidas na média dos ensaios monotônicos. Tal facto, pode ser explicado pela deterioração das propriedades do GRC durante um

carregamento cíclico. Os provetes B2 e T2, cujo comportamento foi diferente, obtendo extensões superiores, foram os provetes em que a face rugosa apresentou uma elevada resistência à tração. Estes resultados e conclusões são concordantes com as conclusões de Ferreira (2001).

Relativamente às tensões máximas atingidas, as verificadas nos ensaios monotónicos são, genericamente superiores, às ocorridas nos ensaios cíclicos. Na placa 2, no entanto, as tensões máximas atingidas por alguns dos provetes no ensaio cíclico aproximam-se mais da ordem de grandeza da tensão média máxima da placa 1.

7 CONCLUSÕES

O cimento reforçado com fibras de vidro, GRC, é um material com grande aplicação em revestimento de fachadas. Os painéis pré-fabricados de fachadas assumem formas muito diversas, mas não são conhecidos regulamentos que possam ser usados para apoiar, com rigor, a sua conceção e análise, nos casos em que estes elementos se encontram sujeitos a esforços importantes. O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação envolveu: (i) pesquisa bibliográfica e estudo do comportamento do material GRC; (ii) planeamento de uma campanha envolvendo ensaios monotónicos do comportamento de painéis à escala real, sujeitos a carregamento lateral; (iii) realização dos ensaios e análise dos seus resultados. Foi possível obter as seguintes conclusões:

- Através dos ensaios com carregamento monotónico de painéis à escala real sujeitos a pressões laterais, foi possível concluir que a rotura acontece na zona central do painel, sendo portanto condicionada pelo momento fletor atuante nessa zona.
- O modo de rotura observado corresponde ao desenvolvimento de uma fenda transversal na lâmina de GRC mais tracionada (a lâmina inferior, nos ensaios em laboratório). O ensaio terminou quando essa fenda apresentava uma abertura sensivelmente igual a 4 mm, sendo que, nesse instante, a força aplicada ao painel (dito de outro modo, o momento fletor instalado na secção mais esforçada) apresentava ainda um valor bastante elevado (percentagem elevada da força de rotura).
- Apesar de terem sido observadas diversas fendas na nervura lateral do painel, ao nível da lâmina inferior de GRC (lâmina mais tracionada) apenas uma fenda abriu. Isto é, não se observou a fissuração generalizada do painel, mas sim a localização das fendas.
- Um dos objetivos do estudo passava pela avaliação da capacidade resistente da zona de ligação entre o painel e a estrutura metálica de suporte, atendendo ao carácter inovador da solução de ligação empregue nos painéis em estudo. No entanto, não foi observada a rotura na zona de fixação em nenhum dos painéis ensaiados, não tendo portanto sido possível, com o presente trabalho, avaliar a capacidade resistente da fixação.
- Caso seja pretendido avaliar efetivamente a capacidade resistente da zona de ligação entre o painel e a estrutura metálica de suporte, recomenda-se o ensaio laboratorial de painéis mais curtos, onde a relação entre o esforço transversal no apoio e o momento fletor na zona de meio - vão seja superior à verificada nos ensaios agora realizados.
- Foi possível verificar que a rotura dos painéis é determinada pela resistência à tração da lâmina inferior de GRC. Na zona onde ocorre a rotura, esta lâmina ficará tracionada ao longo de toda a sua espessura, com um pequeno gradiente de extensões. Isto é, o estado de tensão nesta lâmina será mais próximo da tração pura do que da flexão. A resistência à tração do GRC é correntemente caracterizada por intermédio de ensaios de flexão em lâminas de GRC com vão reduzido, de acordo com a norma NP EN 1170-5. Ora, tratando-se de lâminas de pequena

espessura reforçadas com fibras, verifica-se um grande gradiente de extensões ao longo da espessura da secção onde ocorre a rotura neste ensaio. Assim, a resistência à tração em flexão é consideravelmente superior à resistência à tração pura. Deste modo, os ensaios de flexão de acordo com a norma NP EN 1170-5 não fornecem uma indicação fidedigna da resistência à tração nos painéis reais. Com base no esforço de rotura dos painéis, foi quantificada (de modo simplificado) a tensão máxima de tração instalada na secção de rotura. Os valores obtidos parecem confirmar as afirmações anteriores, uma vez que se obtiveram tensões de tração mais compatíveis com a resistência à tração pura do que com a resistência à tração em flexão. Este facto não pôde ser completamente confirmado, atendendo ao âmbito limitado do presente trabalho.

- A relação força-deslocamento (no ensaio dos painéis) antes da rotura é quase linear, resultado este que é consistente com o facto de a rotura ter ocorrido após a formação de uma fenda localizada. Há um ligeiro desvio da forma exatamente linear, associado à formação de várias fendas na nervura lateral do painel, fendas estas que já foram referidas atrás.
- No âmbito da presente dissertação foram realizados, após o primeiro ensaio de natureza preliminar, ensaios sobre três painéis apenas (dois deles foram ensaiados aos 11 dias após a moldagem e o terceiro ensaiado 67 dias após a moldagem). Os resultados obtidos sugerem que o tempo após a moldagem tem uma influência muito importante sobre a resistência, com a resistência a aumentar ao longo do tempo. É sabido que, no GRC, a tensão limite de proporcionalidade aumenta ao longo do envelhecimento, ao passo que o módulo de rotura diminui com o tempo. O facto de a resposta dos painéis ser quase linear até à rotura, parece indiciar que a tensão limite de proporcionalidade desempenha um papel importante em termos de capacidade resistente do painel e, se assim for, será de esperar que essa resistência aumente ao longo do tempo. Nos ensaios realizados, os painéis mais envelhecidos foram de facto os mais resistentes. No entanto, o número reduzido de painéis ensaiados não permite confirmar estas suposições.
- A curva força-deslocamento (no ensaio dos painéis) exibiu sempre dois picos. O primeiro pico corresponde à carga de rotura, e está associado à formação de uma fenda transversal ao longo de toda a largura da lâmina de GRC mais tracionada (fenda já abordada anteriormente). Sendo o ensaio conduzido com imposição de deslocamento, após esse pico segue-se uma fase em que a força aplicada (e, consequentemente, o momento resistente) diminui à medida que o deslocamento avança. Posteriormente, apesar de existir uma fenda transversal bem aberta na lâmina inferior de GRC, verifica-se um novo ramo ascendente na curva força-deslocamento. Este ramo ascendente está associado ao apoio de uma lâmina de GRC sobre o perfil metálico tubular em forma de losango. Nos ensaios laboratoriais, este perfil existe com geometria e posição semelhante à prevista numa situação real de obra. Trata-se portanto de um mecanismo que poderá existir nessa situação real de obra. No entanto, é importante frisar que o segundo pico da curva não tem interesse prático. Corresponde a uma carga resistente menor do que a do primeiro tipo, e só ocorre para grandes deformações, após existir uma fenda transversal bem aberta.
- Passando agora para a discussão dos resultados dos ensaios cíclicos em provetes de GRC com 30 cm de vão, sujeitos a flexão, pode dizer-se que os provetes ensaiados exibiram o comportamento típico que se espera de materiais cimentícios sujeitos a carregamento cíclico com amplitude constante, exibindo três fases de comportamento: (i) primeira fase com progressão das deformações com velocidade decrescente; (ii) segunda fase com progressão das deformações com velocidade sensivelmente constante; (iii) terceira e última fase com progressão das deformações com velocidade crescente, até à rotura por fadiga.

- Verificou-se que, conforme seria de esperar, o número de ciclos aplicados até à rotura por fadiga diminui quando aumenta o momento máximo aplicado antes e durante o carregamento cíclico.
- Os resultados do ensaio de fadiga foram confrontados com uma curva S-N disponível na bibliografia. Atendendo ao número reduzido de ensaios cíclicos realizados (12) não é possível obter uma curva S-N que caracterize a resistência à fadiga do material em estudo.
- Os resultados obtidos nos ensaios cíclicos parecem indiciar que há uma dependência entre a resistência e a orientação da face mais tracionada durante o ensaio: face em contacto com o molde, ou face livre (superior) durante a moldagem.

BIBLIOGRAFIA

Branco, Carlos Moura - Mecânica dos materiais. *Fundação Calouste Gulbenkian*. (1985).

Ferreira, J. - Caracterização Estrutural do Betão Reforçado com Fibras de Vidro (GRC). Aplicação a Torres de Telecomunicações. Instituto Superior Técnico: Lisboa, 2001.

Global Composite -. Disponível em WWW: <<http://www.global-composite.co.uk/grc-products-cladding-rainscreens>>.

Global Composite - GRC Acoustic Panels & Noise Barriers. Disponível em WWW: <<http://www.global-composite.co.uk/grc-products-acoustic-panels>>.

GRCA International - GRC In Action, Today's GRC for Architects and Engineers. GRCA International, Berkshire, UK, 2003.

RCA International - Practical Design Guide for Glassfibre Reinforced Concrete. Vol. 1.1. (2005).

Hanson, JM - Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. 1974. 0889-325X

Heffernan, Captain PJ - FATIGUE BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP LAMINATES. Royal Military College of Canada, 1997.

Hibbert, AP; Grimer, FJ - Flexural fatigue of glass-fibre-reinforced cement. *Journal of Materials Science*. Vol. 10. n.º 12 (1975). p. 2124-2133. 0022-2461

IPQ - NP EN 1170-5 - Método de ensaio para cimento reforçado com fibra de vidro. 2000: Medição da resistência por flexão, método "ensaio completo de flexão". 2000.

Lee, MK; Barr, BIG - An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26. n.º 4 (2004). p. 299-305. 0958-9465

Rider - Fibre C. Disponível em WWW: <<http://www.rieder.cc/at/en/main/references/reference/19/eurostars-book-hotel-munich/>>.

Santos, J. - Avaliação da Ductilidade das Estruturas de Betão Armado. Abordagem Experimental e Numérica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

Seitl, S; Kersner, Z; Bilek, V; Knesl, Z - Fatigue and fracture parameters of various glass fiber cement based composites. 2013.

Seitl, Stanislav; Keršner, Zbyněk; Bílek, Vlastimil; Knésl, Zdeněk - Glass fibre reinforced cement based composite: fatigue and fracture parameters. (2009). 1835-680X

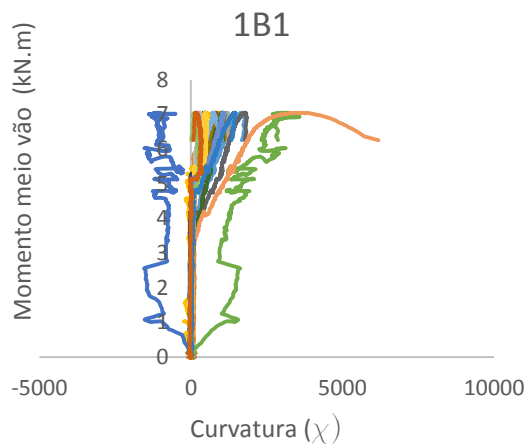
Stathopoulos, Theodore; Zhu, Xiwu - Wind pressures on buildings with mullions. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 116. n.º 8 (1990). p. 2272-2291. 0733-9445

Tavares, C. - Comportamento Resistente de Painéis de Fachada Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

Vetrotex - "Cem-FIL GRC Technical Data", Reino Unido. (1998).

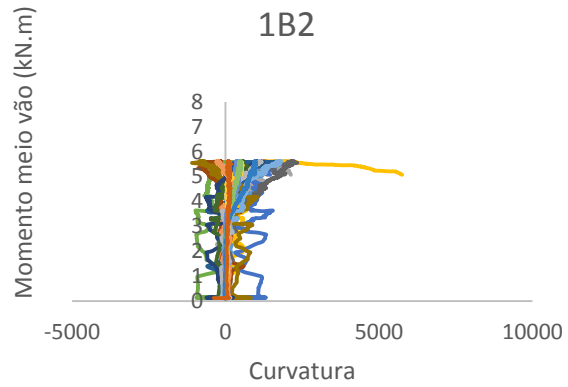
ANEXO I

Diagramas momento – curvatura e Diagramas tensão –
extensão da placa 1



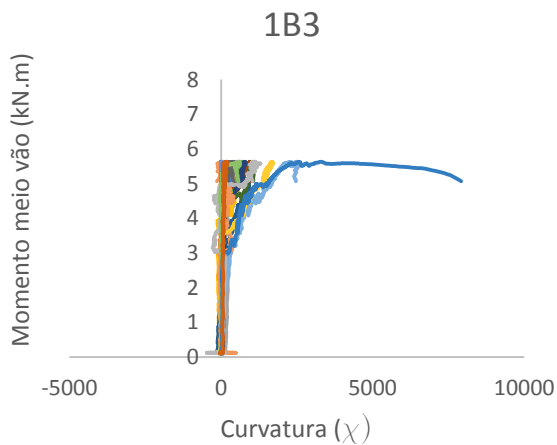
— Posição 1 — Posição 2 — Posição 3
 — Posição 4 — Posição 5 — Posição 6
 — Posição 7 — Posição 8 — Posição 9
 — Posição 10 — Posição 11 — Posição 12
 — Posição 13 — Posição 14 — Posição 15
 — Posição 16 — Posição 17 — Posição 18
 — Posição 19 — Posição 20

Figura 1.1 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B1 para 20 posições



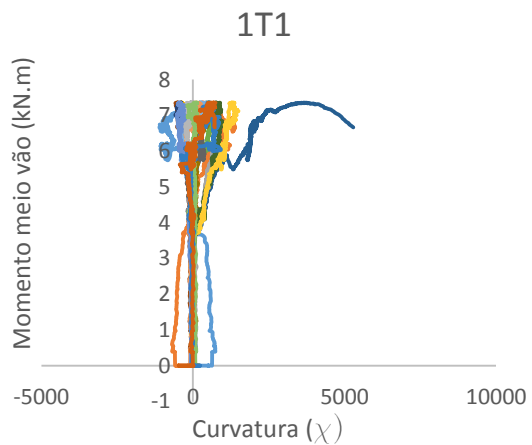
— posição 1 — posição 2 — posição 3
 — posição 4 — posição 5 — posição 6
 — posição 7 — posição 8 — posição 9
 — posição 10 — posição 11 — posição 12
 — posição 13 — posição 14 — posição 15
 — posição 16 — posição 17 — posição 18
 — posição 19 — posição 20

Figura 1.2 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B2 para 20 posições



— Posição 1 — Posição 2 — Posição 3
 — Posição 4 — Posição 5 — Posição 6
 — Posição 7 — Posição 8 — Posição 9
 — Posição 10 — Posição 11 — Posição 12
 — Posição 13 — Posição 14 — Posição 15
 — Posição 16 — Posição 17 — Posição 18
 — Posição 19 — Posição 20

Figura 1.3 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B3 para 20 posições



— posição 1 — posição 2 — posição 3
 — posição 4 — posição 5 — posição 6
 — posição 7 — posição 8 — posição 9
 — posição 10 — posição 11 — posição 12
 — posição 13 — posição 14 — posição 15
 — posição 16 — posição 17 — posição 18
 — posição 19 — posição 20

Figura 1.4 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1T1 para 20 posições

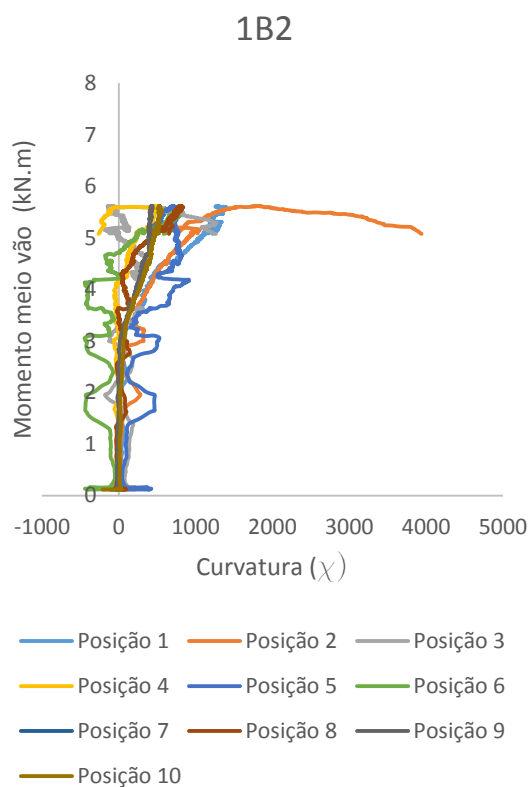


Figura 1.5 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B2 para 10 posições

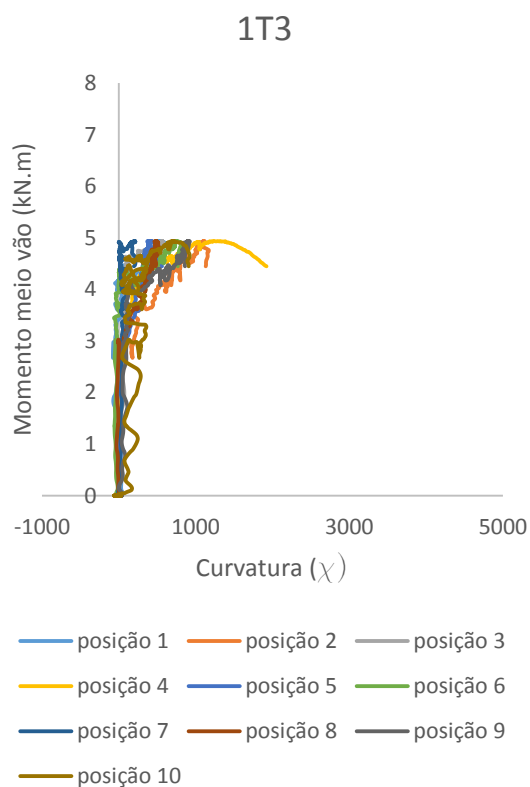


Figura 1.6 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1T3 para 10 posições

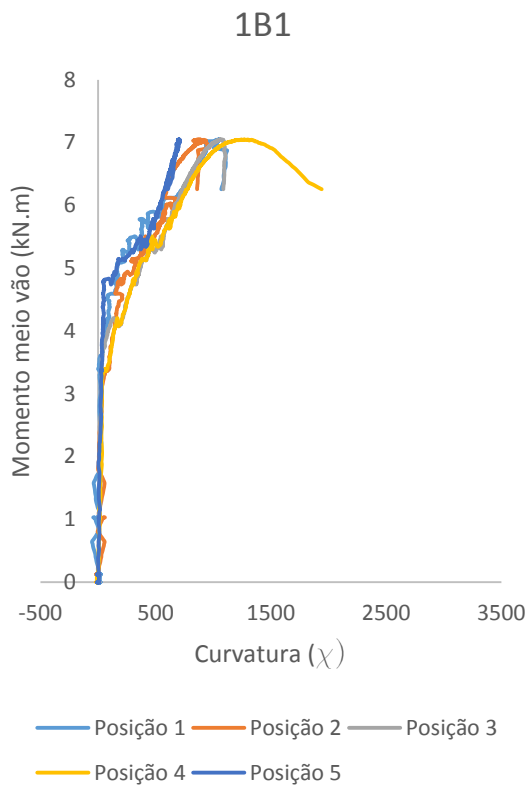


Figura 1.7 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B1 para 5 posições

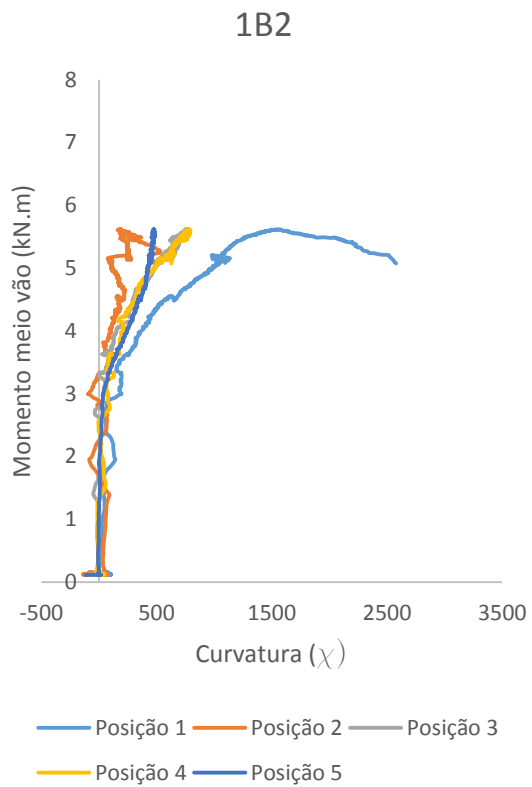


Figura 1.8 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B2 para 5 posições

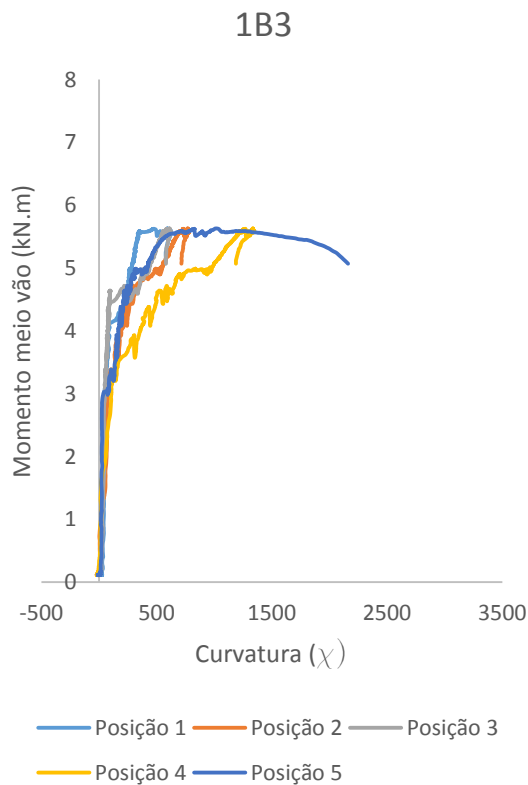


Figura 1.9 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1B3 para 5 posições

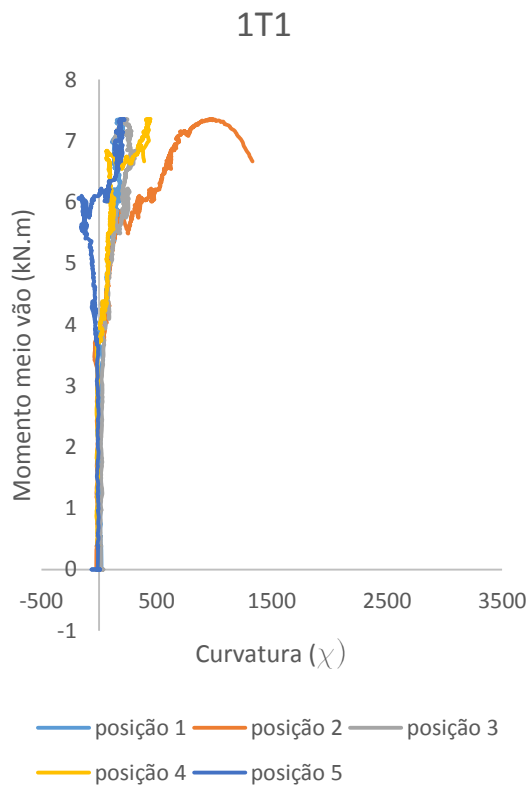


Figura 1.10 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1T1 para 5 posições

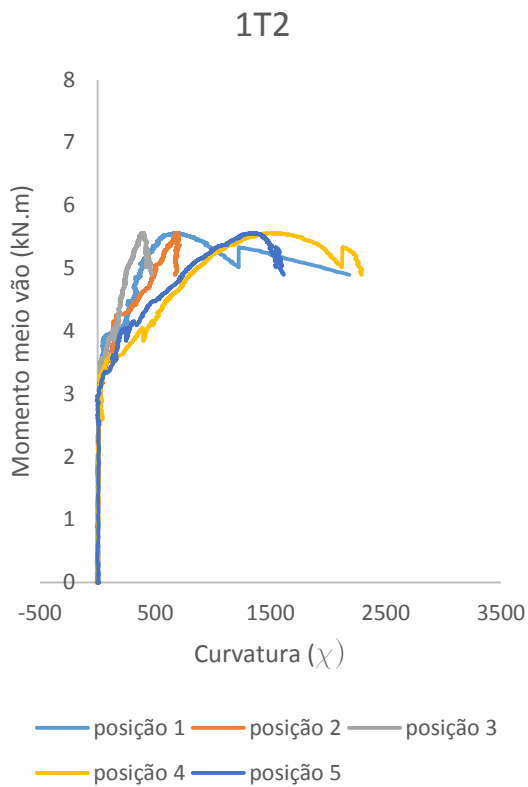


Figura 1.11 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1T2 para 5 posições

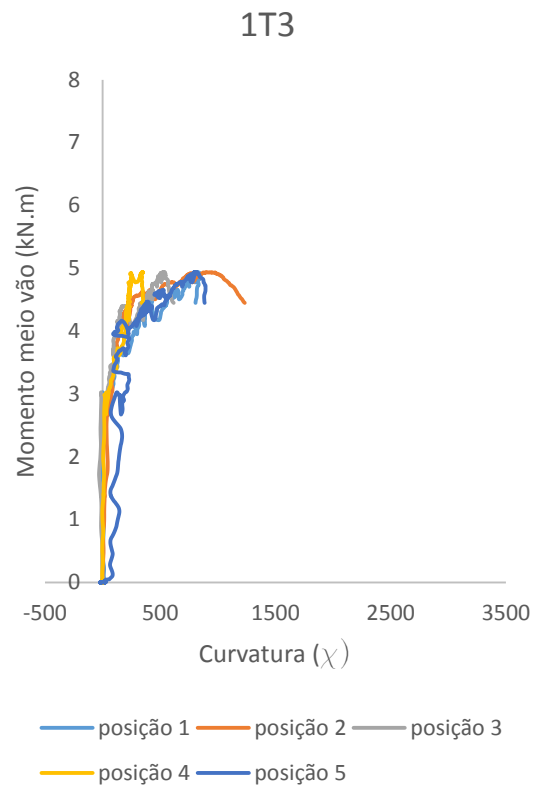


Figura 1.12 – Diagramas momento fletor – curvatura para o provete 1T3 para 5 posições

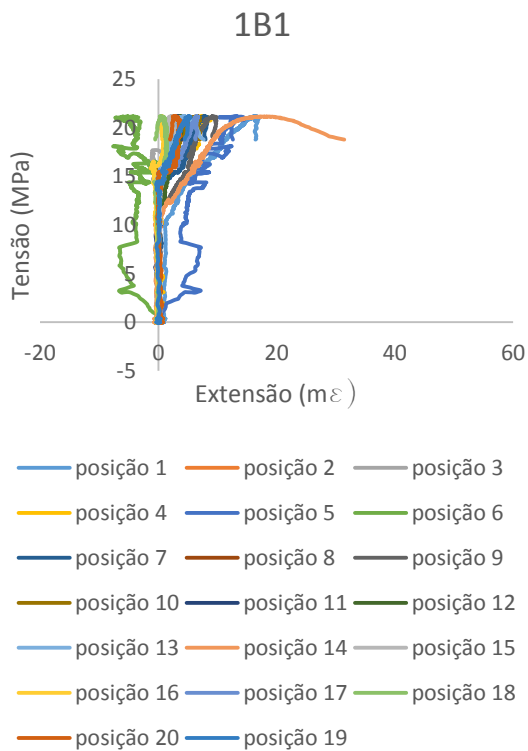


Figura 1.13 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B1 para 20 posições

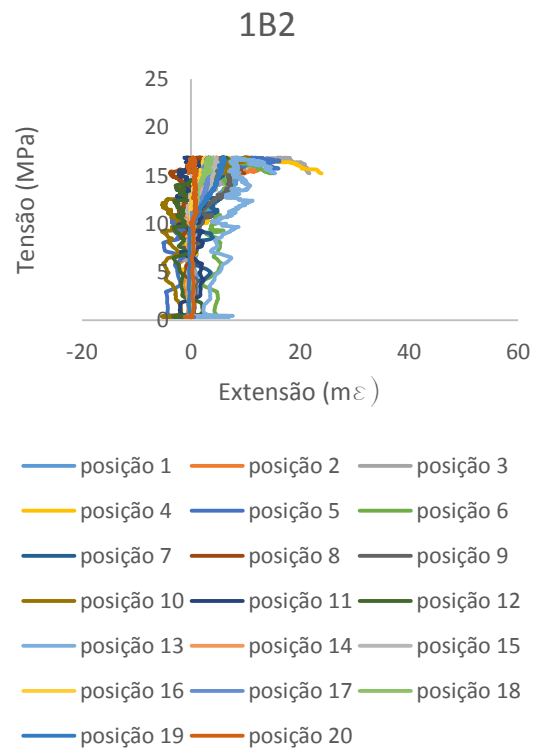
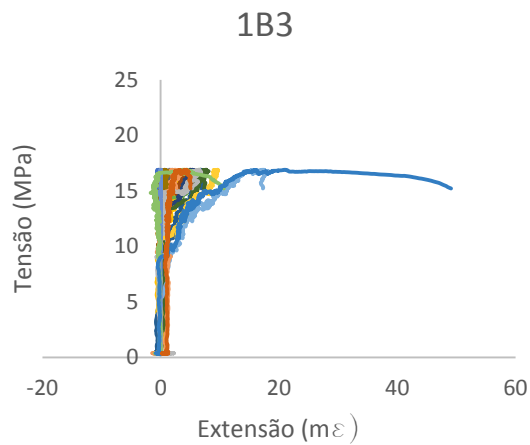
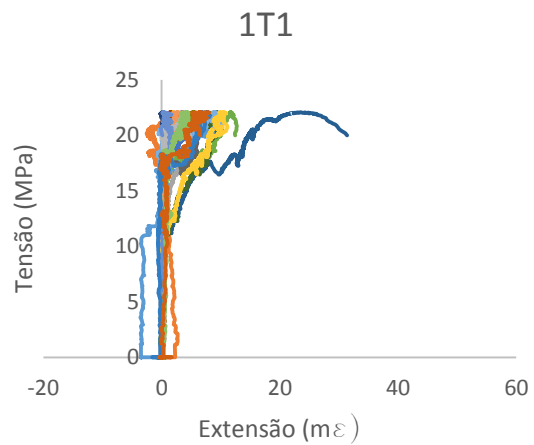


Figura 1.14 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B2 para 20 posições



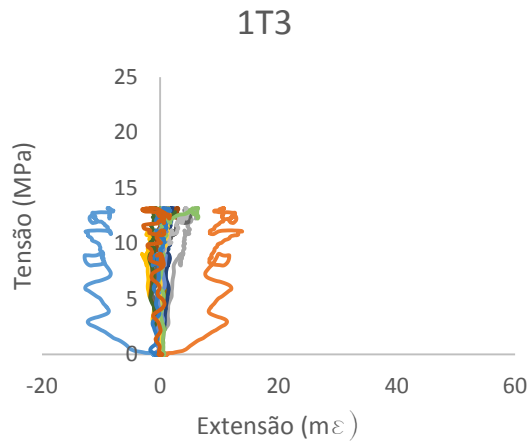
— Posição 1 — Posição 2 — Posição 3
 — Posição 4 — Posição 5 — Posição 6
 — Posição 7 — Posição 8 — Posição 9
 — Posição 10 — Posição 11 — Posição 12
 — Posição 13 — Posição 14 — Posição 15
 — Posição 16 — Posição 17 — Posição 18
 — Posição 19 — Posição 20

Figura 1.15 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B3 para 20 posições



— posição 1 — posição 2 — posição 3
 — posição 4 — posição 5 — posição 6
 — posição 7 — posição 8 — posição 9
 — posição 10 — posição 11 — posição 12
 — posição 13 — posição 14 — posição 15
 — posição 16 — posição 17 — posição 18
 — posição 19 — posição 20

Figura 1.16 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T1 para 20 posições



— posição 1 — posição 2 — posição 3
 — posição 4 — posição 5 — posição 6
 — posição 7 — posição 8 — posição 9
 — posição 10 — posição 11 — posição 12
 — posição 13 — posição 14 — posição 15
 — posição 16 — posição 17 — posição 18
 — posição 19 — posição 20

Figura 1.17 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T3 para 20 posições

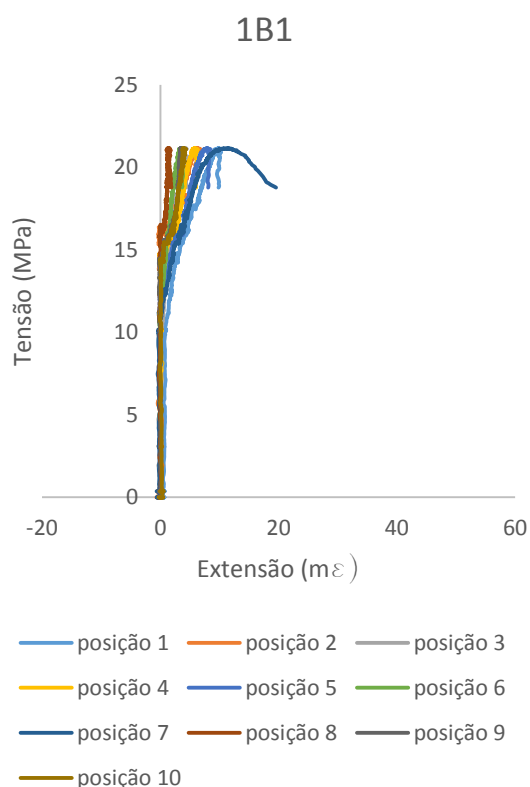


Figura 1.18 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B1 para 10 posições

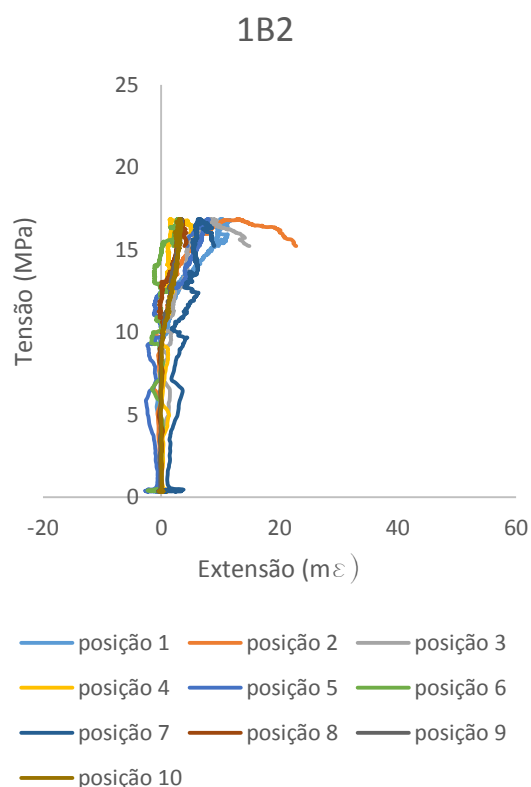


Figura 1.19 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B2 para 10 posições

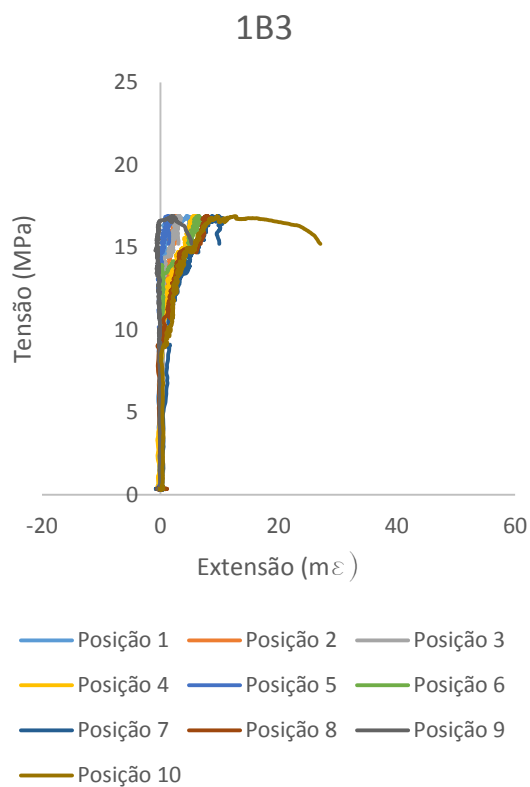


Figura 1.20 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B3 para 10 posições

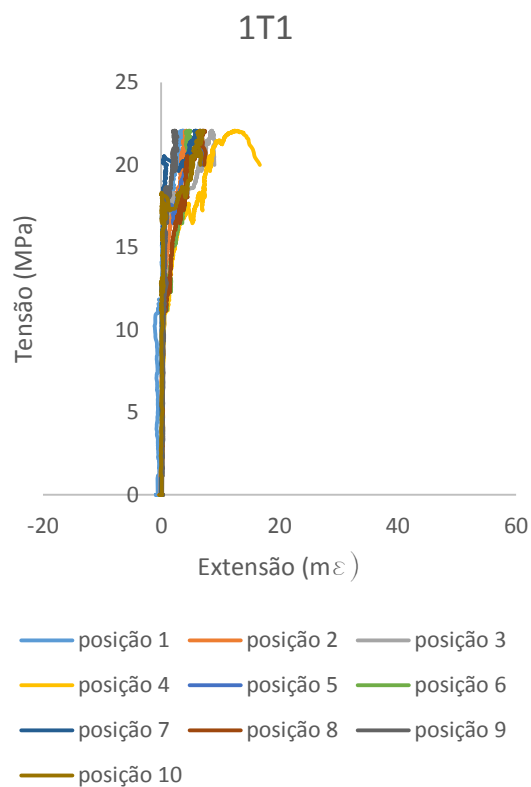


Figura 1.21 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T1 para 10 posições

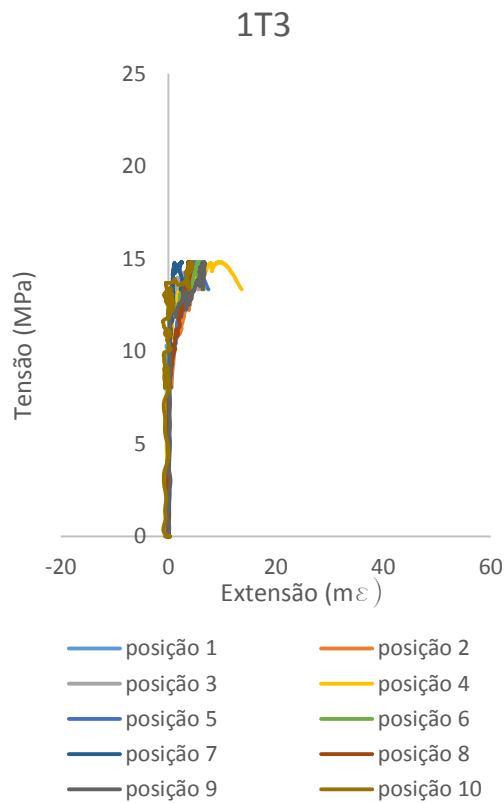


Figura 1.22 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T3 para 10 posições

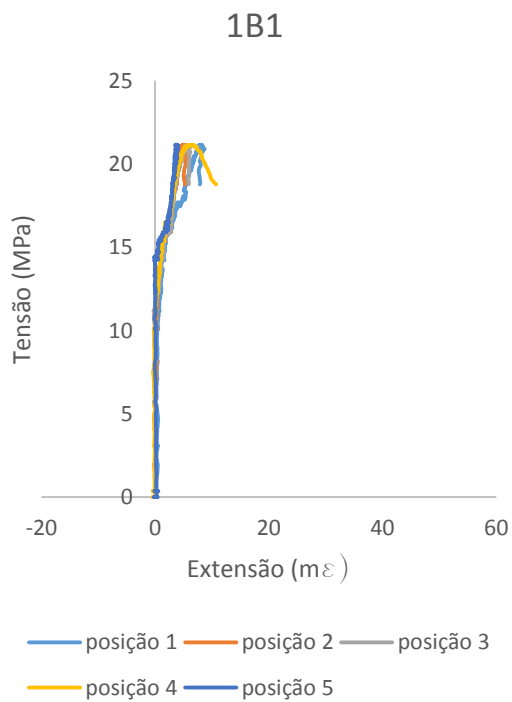


Figura 1.23 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B1 para 5 posições

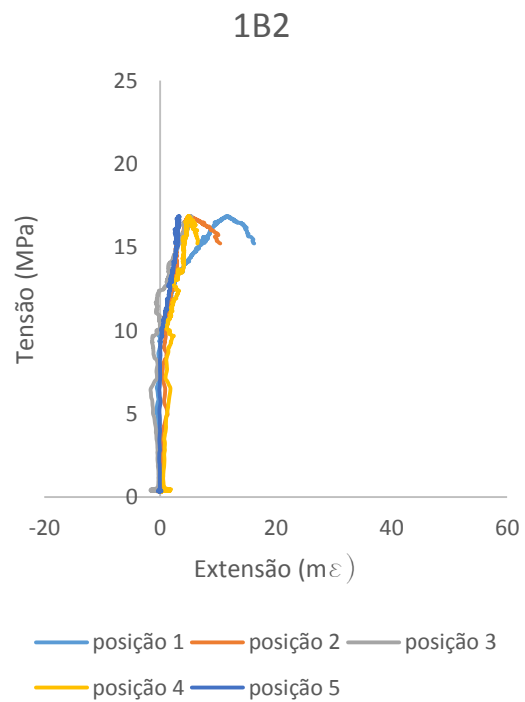


Figura 1.24 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B2 para 5 posições

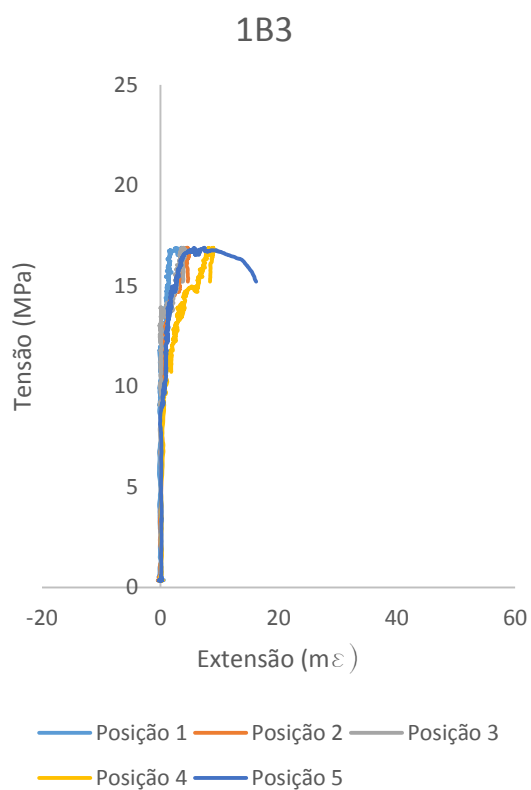


Figura 1.25 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1B3 para 5 posições

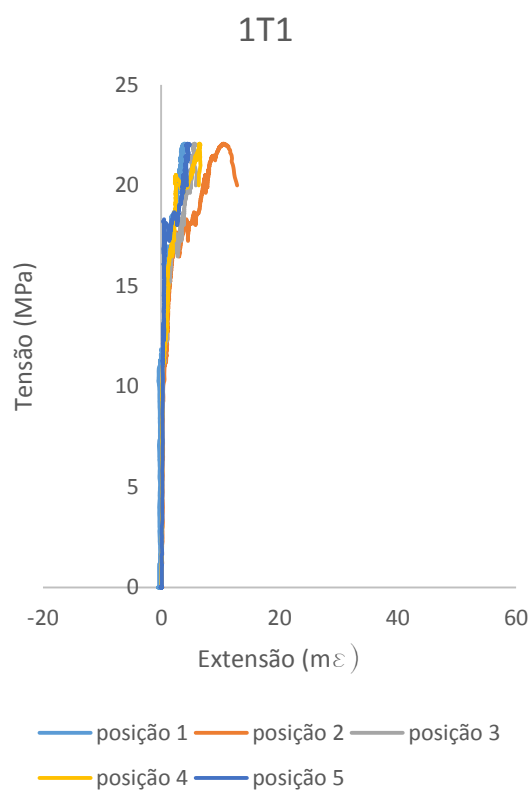


Figura 1.26 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T1 para 5 posições

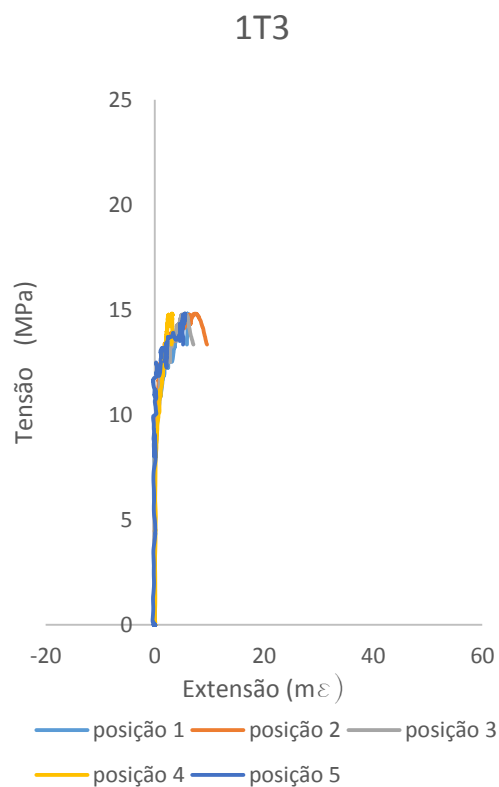


Figura 1.27 – Diagramas tensão – extensão para o provete 1T3 para 5 posições

